

(17)

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2000-101345

(43)Date of publication of application : 07.04.2000

---

(51)Int.Cl. H03B 5/30

---

(21)Application number : 10-285945

(71)Applicant : TDK CORP

(22)Date of filing : 22.09.1998

(72)Inventor : ABE SHUSUKE  
YANO YOSHIHIKO

---

---

(54) VOLTAGE-CONTROLLED OSCILLATOR

---

## (57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a voltage-controlled oscillator VCO that enables practical operation at a center frequency of 2 GHz band, has a sufficient frequency variable width and is made small in size in the VCO whose oscillating element is a piezoelectric bulk vibration element or a surface acoustic wave resonator.

SOLUTION: This voltage-controlled oscillator(VCO) has an oscillation element, that is realized by a piezoelectric bulk vibration element or a surface acoustic wave resonator and a varactor element consisting of a ferroelectric or antiferroelectric thin film clamped by a couple of electrodes. The oscillating element and the varactor element are connected in series, and a control voltage applied to both terminals of the varactor element controls the impedance characteristic of the VCO.

---

LEGAL STATUS

---

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号  
特開2000-101345  
(P2000-101345A)

(43) 公開日 平成12年4月7日 (2000.4.7)

(51) Int.Cl.  
H 0 3 B 5/30

識別記号

F I  
H 0 3 B 5/30

テコード\* (参考)

A

審査請求 未請求 請求項の数7 F D (全 17 頁)

(21) 出願番号 特願平10-285945

(22) 出願日 平成10年9月22日 (1998.9.22)

(71) 出願人 000003067

ティーディーケイ株式会社  
東京都中央区日本橋1丁目13番1号

(72) 発明者 阿部 秀典

東京都中央区日本橋1丁目13番1号 ティーディーケイ株式会社内

(72) 発明者 矢野 義彦

東京都中央区日本橋1丁目13番1号 ティーディーケイ株式会社内

(74) 代理人 100082865

弁理士 石井 陽一

(54) 【発明の名称】 電圧制御発振器

(57) 【要約】

【課題】 圧電バルク振動素子または弾性表面波共振器を発振素子として有するVCO (電圧制御発振器) において、中心周波数2GHz帯での実用的な動作を可能とし、かつ、十分な周波数可変幅を実現する。また、このようなVCOの小型化を実現する。

【解決手段】 圧電バルク振動素子または弾性表面波共振器を備える発振素子と、一対の電極に挟まれた強誘電性薄膜または反強誘電性薄膜を備える可変容量素子とを有し、前記発振素子と前記可変容量素子とが直列接続されており、前記可変容量素子の両端に印加される制御電圧によりインピーダンス特性が制御される電圧制御発振器。

## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 圧電バルク振動素子または弾性表面波共振器を備える発振素子と、一対の電極に挟まれた強誘電性薄膜または反強誘電性薄膜を備える可変容量素子とを有し、前記発振素子と前記可変容量素子とが直列接続されており、前記可変容量素子の両端に印加される制御電圧によりインピーダンス特性が制御される電圧制御発振器。

【請求項 2】 一対の電極に挟まれた圧電性薄膜を有する圧電バルク振動素子と、一対の電極に挟まれた強誘電性薄膜または反強誘電性薄膜を有する可変容量素子とが、基板上に隣接して配置されている請求項 1 の電圧制御発振器。

【請求項 3】 圧電性薄膜および楕型電極を備える弾性表面波共振器と、一対の電極に挟まれた強誘電性薄膜または反強誘電性薄膜を備える可変容量素子とが、基板上に隣接して配置されている請求項 1 の電圧制御発振器。

【請求項 4】 前記可変容量素子に、強誘電性薄膜または反強誘電性薄膜の蓄積電荷量の履歴曲線における飽和電圧以上の電圧を印加した後、制御電圧を印加するか、または、前記飽和電圧を印加した状態で、その飽和電圧とは逆極性の制御電圧を印加することによりインピーダンス特性が制御される請求項 1～3 のいずれかの電圧制御発振器。

【請求項 5】 前記強誘電性薄膜および前記反強誘電性薄膜がエピタキシャル膜である請求項 1～4 のいずれかの電圧制御発振器。

【請求項 6】 前記強誘電性薄膜が Pb 含有ペロブスカイト結晶または BaTiO<sub>3</sub> 結晶を含み、前記反強誘電性薄膜が PbZrO<sub>3</sub> 結晶を含む請求項 1～5 のいずれかの電圧制御発振器。

【請求項 7】 位相同期ループにおける電圧制御発振器として用いられる際に、位相同期ループを動作させるときの入力設定周波数が、前記可変容量素子に飽和電圧を印加したときの発振周波数と一致するか、または、前記可変容量素子に、前記飽和電圧以上の電圧が印加された後に位相同期ループで使用される請求項 1～6 のいずれかの電圧制御発振器。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、移動体通信機器等に利用される電圧制御発振器に関する。

## 【0002】

【従来の技術】最近、800MHz帯から1.9GHz帯を利用した携帯電話、PHS等の移動体通信が急速に普及し、加入者増に対応するため、また、世界共通の電話を実現するため、IMT2000システム等の新しい規格の導入が検討されている。このIMT2000システムでは、フェーズ1として、最大ビットレートが2Mbpsまでのシステムの導入が検討されている。このシステムで

は、帯域幅を5MHz/10MHz/20MHzに広げた広帯域CDMA方式と、周波数ホッピングを盛り込んだTDM方式とが検討された。前者は、直接拡散符号を用いているため、電波の多重伝搬路の干渉により現状では使用帯域幅の限界が5MHzから10MHzといわれており、新たな干渉キャンセル技術の開発が不可欠である。後者は、周波数ホッピングのための高速な周波数シンセサイザが必要であり、この周波数シンセサイザには、中心周波数2GHz帯で動作し、周波数可変幅が5MHzから20MHz（規格化周波数可変幅0.25%から1%）であるVCO（電圧制御発振器）回路が必要である。

【0003】これらのシステムの端末には、利便性を向上させるために従来よりも小型であることが強く要求されている。端末の小型化には、使用する部品の小型化が不可欠である。周波数シンセサイザに用いられるVCO回路の小型化については、従来のディスクリット部品から、ベアチップ実装、さらにはモノリシック化が有効であると考えられているが、さまざまな課題を克服する必要があり、実用化はなかなか進んでいない。

【0004】ところで、単結晶圧電材料を用いた圧電バルク振動素子や弾性表面波共振器は、小型、無調整、高Qで共振損失が小さいなどの特徴があり、バラクタダイオードと組み合わせてVCO回路に利用されている。

【0005】しかし、LiTaO<sub>3</sub>等の単結晶を用いた圧電バルク振動素子を利用したVCO回路は、その使用可能な周波数範囲が数百メガヘルツ以下なので、2GHz帯を利用する通信システムへの適用は不可能である。一方、弾性表面波共振器を用いたVCO回路は、900MHz帯まで研究されている。しかしながら、周波数可変素子のキーパーツであるバラクタダイオードは、2GHz帯の周波数では、抵抗成分が増大し、Qが大幅に低くなり、C/Nが低下し、実用的な特性は得られない。

## 【0006】

【発明が解決しようとする課題】本発明の目的は、圧電バルク振動素子または弾性表面波共振器を発振素子として有するVCO（電圧制御発振器）において、中心周波数2GHz帯での実用的な動作を可能とし、かつ、十分な周波数可変幅を実現することである。また、本発明の他の目的は、このようなVCOの小型化を実現することである。

## 【0007】

【課題を解決するための手段】上記目的は、下記（1）～（7）の本発明により達成される。

（1） 圧電バルク振動素子または弾性表面波共振器を備える発振素子と、一対の電極に挟まれた強誘電性薄膜または反強誘電性薄膜を備える可変容量素子とを有し、前記発振素子と前記可変容量素子とが直列接続されており、前記可変容量素子の両端に印加される制御電圧によりインピーダンス特性が制御される電圧制御発振器。

（2） 一対の電極に挟まれた圧電性薄膜を有する圧電

バルク振動素子と、一對の電極に挟まれた強誘電性薄膜または反強誘電性薄膜を有する可変容量素子とが、基板上に隣接して配置されている上記(1)の電圧制御発振器。

(3) 圧電性薄膜および櫛型電極を備える弾性表面波共振器と、一對の電極に挟まれた強誘電性薄膜または反強誘電性薄膜を備える可変容量素子とが、基板上に隣接して配置されている上記(1)の電圧制御発振器。

(4) 前記可変容量素子に、強誘電性薄膜または反強誘電性薄膜の蓄積電荷量の履歴曲線における飽和電圧以上の電圧を印加した後、制御電圧を印加するか、または、前記飽和電圧を印加した状態で、その飽和電圧とは逆極性の制御電圧を印加することによりインピーダンス特性が制御される上記(1)～(3)のいずれかの電圧制御発振器。

(5) 前記強誘電性薄膜および前記反強誘電性薄膜がエピタキシャル膜である上記(1)～(4)のいずれかの電圧制御発振器。

(6) 前記強誘電性薄膜がPb含有ペロブスカイト結晶またはBaTiO<sub>3</sub>結晶を含み、前記反強誘電性薄膜がPbZrO<sub>3</sub>結晶を含む上記(1)～(5)のいずれかの電圧制御発振器。

(7) 位相同期ループにおける電圧制御発振器として用いられる際に、位相同期ループを動作させるときの入力設定周波数が、前記可変容量素子に飽和電圧を印加したときの共振周波数と一致するか、または、前記可変容量素子に、前記飽和電圧以上の電圧が印加された後に位相同期ループで使用される上記(1)～(6)のいずれかの電圧制御発振器。

#### 【0008】

##### 【発明の実施の形態】第1実施例

図1に、発振素子として圧電バルク振動素子を利用したVCOの実施例を示す。

【0009】このVCOは、ダイアフラム1が形成されたSi(100)単結晶基板(以下、単にSi基板という)2を有し、Si基板2上に、酸化シリコン層/酸化ジルコニウム層/チタン酸バリウム層からなるパッド層3、白金からなる下地電極4、PZTからなる強誘電性・圧電性薄膜5およびAuからなる上部電極61、62をこの順で有する。

【0010】ダイアフラム1は、Si基板2を図中下側からエッチングすることにより形成したものであり、厚さは20μmである。

【0011】強誘電性・圧電性薄膜5は、フォトリソグラフィ技術により部分的にエッチングしてある。エッチングした領域は、ダイアフラム1上を除く領域の一部である。強誘電性・圧電性薄膜5の厚さは0.7μmであり、エッチング領域では0.6μmである。上部電極61は、エッチング領域上に存在し、上部電極62は、ダイアフラム1上に存在する。強誘電性・圧電性薄膜5

は、多元蒸着法により形成したが、MBE法やRFマグネトロンスパッタ法などによって形成することもできる。この強誘電性・圧電性薄膜5が、後述するエピタキシャル膜であることは、RHEEDにより確認した。X線回折による分析では、この薄膜は90°ドメインが形成された(001)配向膜であり、ピーク強度比は、 $(100)/(001)=0.98$ であった。また、蛍光X線による組成分析の結果、膜中の原子比はZr:Ti=23.8:76.2であった。

【0012】このVCOにおいて、強誘電性・圧電性薄膜5のエッチングされた領域と、これを挟む下地電極4および上部電極61とが、可変容量素子を構成する。また、ダイアフラム1上の強誘電性・圧電性薄膜5と、これを挟む下地電極4および上部電極62とが、圧電バルク振動素子を構成する。両素子において強誘電性・圧電性薄膜5の厚さが異なるのは、それぞれの素子に最適化したためである。なお、上部電極61の寸法は14μm角であり、上部電極62の寸法は15μm角である。また、上部電極61は、圧電バルク振動素子のインピーダンス特性への影響がないように、上部電極62の端から約200μm離れた位置に設けてある。

【0013】可変容量素子の誘電率をウェハプローブで測定したところ、約240ε<sub>0</sub>であった。ここで、ε<sub>0</sub>は真空の誘電率である。

【0014】なお、図1に示すSi基板2ならびにその上の薄膜および電極は、Siウェハをエッチングしてダイアフラムを形成し、Siウェハ上に電極および薄膜を形成した後、ダイシング装置を用いてチップに分割することにより作製した。

【0015】Si基板2の下面は、ダイボンド剤10によりパッケージ11の底面に接着され、パッケージ11の上部は蓋13により封止されている。パッケージ11内には、外部と連絡する外部接続端子A、B、Cが存在し、これらは、ワイヤ12を介して上部電極61、下地電極4、上部電極62とそれぞれ電氣的に接続して、可変容量素子と圧電バルク振動素子とを直列に接続している。図4に、このVCOの動作を説明するための電氣的等価回路を示す。図4において、可変容量素子202と発振素子(圧電バルク振動素子)201とは直列に接続されている。図4に示すA、B、Cは、図1に示す外部接続端子A、B、Cに対応する。

【0016】このVCOにおいて、パッケージ11の外部端子を利用し、Sawyer-Tower法に基づいて、可変容量素子の上部電極61と下地電極4との間に最大振幅5V程度の低周波電圧を印加したところ、図2に示す蓄積電荷量の履歴曲線14が得られた。図2から、この場合の飽和電圧が約4Vであることがわかる。また、この履歴曲線14の傾きから、図3に示す容量の印加電圧依存性曲線15を得た。図3の縦軸は、印加電圧が零のときの容量で規格化してある。この可変容量素子は、低周波電

圧や直流電圧を印加した後も、履歴曲線や容量の経時変化が小さく、可変容量素子として十分に実用に耐えることが判明した。

【0017】図4を用いて、このVCOの動作を説明する。能動回路200は、負性抵抗 $-R_c$ と容量リアクタンス $X_c$ とをもち、発振素子201はインピーダンス $R_e(w) + jX_e(w)$ をもち、可変容量素子202はインピーダンス $R(V) + jX(V)$ をもつとしてある。ここで $V$ は、可変容量素子202に印加する電圧を表す。このVCO回路の発振条件は、 $R(V) + R_e(w) < |R_c|$  および  $X_e(w) + X(V) = X_c$  であることが知られており、また、高周波帯で使用可能な能動回路の $X_c$ は、一般的に30~100Ω程度の値をもつことも知られている。

【0018】第1実施例における可変容量素子の飽和電圧である4Vを図4のAB間に印加したときのAC間におけるインピーダンスの共振特性を、図5に示す。図中、インピーダンスの実数部、虚数部、絶対値をそれぞれ、曲線23、24、25で示す。本実施例では、強誘電性・圧電性薄膜5がエピタキシャル膜なので、可変容量素子の損失が極めて小さくなり、その結果、共振周波数近傍におけるインピーダンスの実数部が数オーム以下となり、発振条件の一部である $R(V) + R_e(w) < |R_c|$ を十分に満たしている。

【0019】図6に、図4のAB間の印加電圧（制御電圧）を変化させたときの、AC間におけるインピーダンスの絶対値および虚数部の変化を示す。同図において、曲線26、27、28は、制御電圧がそれぞれ3.5V、1.3V、-0.5Vのときのインピーダンスの絶対値を表し、曲線29、30、31は、制御電圧がそれぞれ3.5V、1.3V、-0.5Vのときのインピーダンスの虚数部を表す。なお、この測定は、飽和電圧である4VをAB間に印加した後に行った。能動回路のリアクタンス $X_c$ を一般的な値である50Ωに設定し、AB間の制御電圧を3.5Vから-0.5Vまで変化させたとき、発振条件を満たす周波数を図6から見積もると、2.042GHzから2.020GHzまで変化することがわかる。これを規格化周波数可変幅に直すと、約1%となる。

【0020】また、図4のAB間に、可変容量素子のもう一方の飽和電圧である-4Vを印加した後、能動回路のリアクタンス $X_c$ を50Ωと設定し、制御電圧を-3.5V、-1.3V、+0.5Vと変化させると、発振条件を満たす周波数は2.042GHzから2.020GHzまで変化した。この場合も、規格化周波数可変幅が約1%となる。

【0021】図13に、位相同期ループの概念図を示す。この位相同期ループは、位相差検出器（位相比較器）100、ループフィルタ101、増幅器102およびVCO103からなる。この位相同期ループを動作

させると、まず、VCO103の入力電圧が零に設定された自走周波数で発振し、その後、入力信号の設定周波数に引き込まれる。この実施例のVCOを図13に示すVCO103として用い、図4のAB間に直流電圧5Vを印加してから位相同期ループを動作させると、増幅器102からフィードバックされたVCOへの入力電圧が零で発振し始め、VCOの出力周波数は2.042GHzとなり、この周波数より低い周波数に設定した入力周波数に自動的に引きこまれた。

【0022】ここでは図4のAB間に直流電圧を印加したが、強誘電性薄膜の自発分極が追従しない低周波電圧を印加してもよい。また、制御電圧を印加する前にAB間に印加する電圧は、蓄積電荷量の履歴曲線における飽和電圧以上の電圧であればよい。飽和電圧以上の電圧を印加すれば、図2に示すような定まった履歴曲線を利用できるので、制御電圧に対応する安定した発振周波数が得られる。また、絶対値が飽和電圧以上であれば、AB間に印加する電圧はマイナス側であってもよく、例えば、印加電圧を-5Vとしてもよい。なお、制御電圧は、飽和電圧以下とする。

【0023】また、AB間に前記飽和電圧を印加しながら制御電圧を印加する構成としてもよい。この場合、AB間に飽和電圧を印加しながら、別の回路を用いてAB間に制御電圧を印加する。この場合、制御電圧は飽和電圧に対し逆極性とし、AB間の電圧が飽和電圧を超えないようにする。この構成においても、制御電圧に対応する安定した発振周波数が得られる。

【0024】位相同期ループでは、まず、VCOへの入力電圧が零の自走周波数で発振するため、従来のVCOを本発明のVCOに単に置き換えた場合、可変容量素子に電圧が印加されず、制御電圧に対応する安定した発振周波数が得られない場合がある。しかし、上記したようにAB間にいったん電圧を印加した後、制御電圧を印加するか、電圧を印加しながら制御電圧を印加することにより、正確な動作が可能となる。

【0025】また、本発明のVCOを位相同期ループに適用する場合、位相同期ループを動作させるときの入力設定周波数を、可変容量素子に上記飽和電圧を印加したときの発振周波数と一致させる構成としてもよい。この場合には、上記飽和電圧に相当する電圧が可変容量素子に自動的に印加されるため、正確な動作が可能となる。そして、その後に、入力設定周波数を所望の値に設定すればよい。

【0026】上記したように、本発明では発振素子に可変容量素子を接続し、図4のAB間に制御電圧を印加することによりAC間のインピーダンスを変化させて、発振周波数を変更可能とする。本発明のVCOには、携帯電話等で利用されている5V以下程度の低電圧を制御電圧として用い、2GHz前後の高周波域において規格化周波数可変幅1%程度以上を実現できることが要求され

る。そこで、このような要求を満足するために可変容量素子に必要とされる特性について考察する。

【0027】前述したように図6には、図4のAB間の制御電圧を変化させたときのAC間のインピーダンス変化を示してある。図6において、曲線29、30、31は、制御電圧がそれぞれ3.5V、1.3V、-0.5Vのときのインピーダンス虚数部の周波数応答を表す。図6に示されるように、同一周波数で比較したとき、インピーダンス虚数部は制御電圧が増大するにしたがって低下する。可変容量素子を接続しない状態での周波数応答曲線を基準にすると、制御電圧の増大に伴って周波数応答曲線は図中垂直方向にほぼ平行に移動する。そして、この平行移動によるインピーダンス虚数部の低下の度合いは、可変容量素子の強誘電性薄膜または反強誘電性薄膜の特性に依存する。具体的には、図3に示される電圧-規格化容量曲線に固有のものとなる。この電圧-規格化容量曲線は、薄膜の組成、結晶性、厚さなどに依存する。

【0028】図14に、インピーダンス虚数部の周波数応答曲線を模式的に示す。曲線301は、可変容量素子を接続しない場合であり、本明細書ではこれを基準曲線という。曲線302は制御電圧-0.5Vの場合であり、基準曲線からの平行移動量（低下量）は $d_{-0.5}\Omega$ である。曲線303は制御電圧3.5Vの場合であり、基準曲線からの平行移動量（低下量）は $d_{3.5}\Omega$ である。可変容量素子における制御電圧を-0.5~3.5Vの間で変化させることによる規格化周波数可変幅は、 $(\lambda_{\max}-\lambda_{\min})/\lambda_{\max}$ で表される。発振周波数は、能動回路のリアクタンス $X_c$ と等しいインピーダンス値に対応する周波数なので、ここでは、インピーダンス虚数部が $50\Omega$ （能動回路の $X_c$ の一般的な値）となる周波数を採用する。したがって、 $\lambda_{\min}$ は曲線302において $50\Omega$ に対応する周波数であり、 $\lambda_{\max}$ は曲線303において $50\Omega$ に対応する周波数である。2GHz程度の高周波域では $\lambda_{\max}-\lambda_{\min}$ に対し $\lambda_{\max}$ が著しく大きいいため、規格化周波数可変幅は実質的に $\lambda_{\max}-\lambda_{\min}$ の大きさに決定されることになる。

【0029】図14において、 $d_{3.5}-d_{-0.5}$ を $d_{-0.5}$ で規格化した値、すなわち $(d_{3.5}-d_{-0.5})/d_{-0.5}$ を、本明細書ではインピーダンス虚数部の規格化変化幅と呼ぶ。 $(d_{3.5}-d_{-0.5})/d_{-0.5}$ は、 $\lambda_{\max}-\lambda_{\min}$ と密接に相関する値である。特定の強誘電性薄膜または反強誘電性薄膜を備える可変容量素子を接続した場合、 $d_{3.5}$ および $d_{-0.5}$ は可変容量素子の電極面積に依存して変化するが、 $(d_{3.5}-d_{-0.5})/d_{-0.5}$ は電極面積によらず一定となる。 $(d_{3.5}-d_{-0.5})/d_{-0.5}$ が一定である場合、可変容量素子の電極面積が小さいほど $d_{3.5}$ および $d_{-0.5}$ は大きくなる。インピーダンス応答曲線が直線であれば、 $(d_{3.5}-d_{-0.5})/d_{-0.5}$ が一定の条件下で $d_{3.5}$ および $d_{-0.5}$ が増大すると、 $\lambda_{\max}$ およ

び $\lambda_{\min}$ が高周波側に移動すると共に $\lambda_{\max}-\lambda_{\min}$ が大きくなって規格化周波数可変幅が大きくなるが、実際にはインピーダンス応答曲線は高周波側ほど傾きが増大する。このため、可変容量素子の電極面積がある程度小さくなると、 $\lambda_{\max}-\lambda_{\min}$ は減少に向かうことになる。一方、電極面積が大きくなるほど $d_{3.5}$ および $d_{-0.5}$ は小さくなる。 $(d_{3.5}-d_{-0.5})/d_{-0.5}$ が一定の条件下で $d_{3.5}$ および $d_{-0.5}$ が減少すると、 $\lambda_{\max}$ および $\lambda_{\min}$ が低周波側に移動すると共に $\lambda_{\max}-\lambda_{\min}$ が小さくなって規格化周波数可変幅が小さくなる。

【0030】したがって、可変容量素子の電極面積を適宜選択することにより、最大の規格化周波数可変幅が得られることになる。例えば、 $14\mu\text{m}$ 角の電極を設けた場合、

$$d_{3.5}=199\Omega、$$

$$d_{-0.5}=109\Omega、$$

$$(d_{3.5}-d_{-0.5})/d_{-0.5}=0.82、$$

$$\lambda_{\max}=2.042\text{GHz}、$$

$$\lambda_{\min}=2.020\text{GHz}、$$

$$20 \text{ 規格化周波数可変幅}=1.09\%$$

となる。これに対し、 $10\mu\text{m}$ 角の電極を設けた場合、

$$d_{3.5}=392\Omega、$$

$$d_{-0.5}=215\Omega、$$

$$(d_{3.5}-d_{-0.5})/d_{-0.5}=0.82、$$

$$\lambda_{\max}=2.063\text{GHz}、$$

$$\lambda_{\min}=2.045\text{GHz}、$$

$$\text{規格化周波数可変幅}=0.88\%$$

となる。また、 $30\mu\text{m}$ 角の電極を設けた場合、

$$d_{3.5}=43.7\Omega、$$

$$30 \text{ } d_{-0.5}=23.9\Omega、$$

$$(d_{3.5}-d_{-0.5})/d_{-0.5}=0.82、$$

$$\lambda_{\max}=1.989\text{GHz}、$$

$$\lambda_{\min}=1.978\text{GHz}、$$

$$\text{規格化周波数可変幅}=0.56\%$$

となる。すなわち、上記3例の中では、 $14\mu\text{m}$ 角の電極を設けた場合以外は、1%以上の規格化周波数可変幅を得ることはできない。

【0031】なお、 $(d_{3.5}-d_{-0.5})/d_{-0.5}$ は、可変容量素子の強誘電性薄膜または反強誘電性薄膜の特性によって決定され、また、最大の規格化周波数可変幅が得られる電極面積は $(d_{3.5}-d_{-0.5})/d_{-0.5}$ の値に対応して変化するため、制御電圧-0.5~3.5Vのときに最大の規格化周波数可変幅を与える電極面積は、可変容量素子の強誘電性薄膜または反強誘電性薄膜の特性に応じて求めればよい。ただし、 $(d_{3.5}-d_{-0.5})/d_{-0.5}$ が小さすぎると、適切な電極面積を選んでも $\lambda_{\max}-\lambda_{\min}$ を大きくすることが難しくなる。具体的には、圧電材料としてPZTエピタキシャル膜またはKNbO<sub>3</sub>単結晶を用いた発振素子（弾性表面波共振器または圧電バルク振動素子）と同等のインピーダンス特性を

有する発振素子において、制御電圧を $-0.5 \sim 3.5$  Vとしたときに規格化周波数可変幅を1%以上とするためには、 $(d_{3.5} - d_{-0.5}) / d_{-0.5}$ が0.76以上であることが好ましい。一方、 $(d_{3.5} - d_{-0.5}) / d_{-0.5}$ が大きすぎると、周波数応答曲線の傾きが大きくなる周波数領域を使うことになり、この周波数領域ではインピーダンスの実数部が増大して発振条件 $R(V) + Re(w) < |Rc|$ を満たせなくなる。したがって、 $(d_{3.5} - d_{-0.5}) / d_{-0.5}$ の値は、上記発振条件を満足する周波数領域において所望の規格化周波数可変幅が得られるものであればよい。例えば、ここで例示する発振素子を用いた場合に規格化周波数可変幅を1%以上とするためには、 $(d_{3.5} - d_{-0.5}) / d_{-0.5}$ が1.35以下であることが好ましい。

【0032】さらに、上記した動作原理から、インピーダンス虚数部の周波数応答曲線の傾きが小さいほど、規格化周波数可変幅を大きくできることがわかる。周波数応答曲線の傾きは、発振素子の圧電性材料の電気機械結合係数 $k^2$ に反比例する。圧電性材料の $k^2$ は、薄膜ではPZTエピタキシャル膜が最大であり、単結晶ではKNbO<sub>3</sub>が最大である。したがって、これらの圧電性材料を用いることにより、規格化周波数可変幅を大きくすることができる。

#### 【0033】第2実施例

図7に、発振素子として弾性表面波共振器を利用したVCOの実施例を示す。

【0034】このVCOは、Si基板2を有し、Si基板2上に、酸化シリコン層／酸化ジルコニウム層／チタン酸バリウム層からなるパッド層3、白金からなる下地電極4およびPZTからなる強誘電性・圧電性薄膜51、52を有する。強誘電性・圧電性薄膜51、52は、厚さが異なる。強誘電性・圧電性薄膜51上には、Auからなる上部電極61が設けられ、強誘電性・圧電性薄膜52上には、それぞれA1からなる櫛形電極63およびストリップ反射器(図示せず)が設けられている。

【0035】強誘電性・圧電性薄膜51、52は、第1実施例と同様にして形成した強誘電性・圧電性薄膜を、フォトリソグラフィ技術によりエッチングすることにより形成した。強誘電性・圧電性薄膜51の厚さは0.6  $\mu\text{m}$ であり、強誘電性・圧電性薄膜52の厚さは0.7  $\mu\text{m}$ である。

【0036】このVCOにおいて、強誘電性・圧電性薄膜51と、これを挟む下地電極4および上部電極61とが、可変容量素子を構成する。また、強誘電性・圧電性薄膜52と、これを挟む下地電極4および櫛形電極63、ストリップ反射器とが、弾性表面波共振器を構成する。両素子において強誘電性・圧電性薄膜の厚さが異なるのは、それぞれの素子に最適化したためである。また、両素子において強誘電性・圧電性薄膜を独立させた

のは、互いへの影響を抑えるためである。上部電極61の寸法は、35  $\mu\text{m}$ 角であり、開口長15  $\mu\text{m}$ をもつ櫛形電極63とストリップ反射器とにおいて、線幅は0.4  $\mu\text{m}$ である。櫛形電極63の対数は30、ストリップ反射器の本数は100とした。櫛形電極63とストリップ反射器との距離は、中心間距離で0.8  $\mu\text{m}$ とした。櫛形電極63およびストリップ反射器は、弾性表面波の伝搬方向が図7を垂直に貫くように、かつ、上部電極61との中心間距離が200  $\mu\text{m}$ となるように配置し、上部電極61による弾性表面波共振器のインピーダンス特性への影響がないように配慮した。

【0037】なお、図7に示すSi基板2ならびにその上の薄膜および電極は、Siウエハ上に電極および薄膜を形成した後、ダイシング装置を用いてチップに分割することにより作製した。

【0038】Si基板2の下面は、ダイボンド剤10によりパッケージ11の底面に接着され、パッケージ11の上部は蓋13により封止されている。パッケージ11内には、外部と連絡する外部接続端子A、B、Cが存在し、これらは、ワイヤ12を介して上部電極61、下地電極4、櫛形電極63の出力電極パッドとそれぞれ電気的に接続している。また、櫛形電極63の入力電極パッドは、ワイヤ12を介して下地電極4に接続している。このVCOにおいても、可変容量素子と発振素子である弾性表面波共振器とは、直列に接続されている。

【0039】このVCOの可変容量素子について、第1実施例と同様にして蓄積電荷量の履歴曲線を得、これから飽和電圧を求めたところ、4Vであった。この可変容量素子においても、図3に示すような容量の印加電圧依存性が存在する。

【0040】したがって、可変容量素子と弾性表面波共振器とを直列接続したVCOの動作は、図4を用いて説明した第1実施例の動作と同じとなる。そこで、可変容量素子にその飽和電圧である4Vを印加した後、印加電圧(制御電圧)を3.5Vまたは $-0.5$ Vに設定して、VCOのAC間におけるインピーダンスの絶対値および虚数部を測定した。結果を図8に示す。図8において、曲線44、45は、印加電圧がそれぞれ3.5V、 $-0.5$ Vのときのインピーダンスの絶対値を表し、曲線46、47は、印加電圧がそれぞれ3.5V、 $-0.5$ Vのときのインピーダンスの虚数部を表す。

【0041】ここで、図4における能動回路のリアクタンス $X_c$ を一般的な値である50  $\Omega$ に設定し、印加電圧を3.5Vから $-0.5$ Vまで変化させたとき、発振条件を満たす周波数を図8から見積もると、規格化周波数可変幅が約1%となることがわかる。

#### 【0042】第3実施例

図9(E)に、発振素子として圧電バルク振動素子を用いたVCOの実施例を示す。

【0043】このVCOは、ダイヤフラム1が形成され

10

20

30

40

50

た Si 基板 2 を有し、Si 基板 2 上に、酸化シリコン層／酸化ジルコニウム層／チタン酸バリウム層からなるパッファ層 3、白金からなる下地電極 4 をこの順で有し、下地電極 4 上に、 $PbZrO_3$  からなる反強誘電性薄膜 53 およびその上の上部電極 61 と、PZT からなる強誘電性・圧電性薄膜 5 およびその上の上部電極 62 とを、それぞれ有する。ダイヤフラム 1 および強誘電性・圧電性薄膜 5 は、第 1 実施例と同様にして形成したものである。

【0044】強誘電性・圧電性薄膜 5 および上部電極 62 は、ダイヤフラム 1 上に存在し、下地電極 4 とあわせて圧電バルク振動素子を構成する。一方、反強誘電性薄膜 53 および上部電極 61 は、ダイヤフラム 1 上を除く領域の一部に形成され、下地電極 4 とあわせて可変容量素子を構成する。上部電極 61 は  $30\mu m$  角であり、上部電極 62 は  $15\mu m$  角である。上部電極 61 は、圧電バルク振動素子のインピーダンス特性への影響がないように、上部電極 62 の端から  $200\mu m$  離れた位置に設けてある。

【0045】ここで、両素子の製造プロセスを、図 9 (A) ～図 9 (D) により説明する。まず、ダイヤフラム 1 を形成した Si 基板 2 上に、パッファ層 3、下地電極 4 および強誘電性・圧電性薄膜 5 を第 1 実施例と同様にして形成する。次いで、強誘電性・圧電性薄膜 5 上に、エッチング可能な誘電体薄膜 54 を形成する [図 9 (A)]。続いて、誘電体薄膜 54 および強誘電性・圧電性薄膜 5 を、圧電バルク振動素子となる領域を除いて、フォトリソグラフィ技術により除去する [図 9 (B)]。次いで、除去により現れた下地電極 4 上に、厚さ約  $0.6\mu m$  の反強誘電性薄膜 53 を形成する [図 9 (C)]。次に、強誘電性・圧電性薄膜 5 上に残っている誘電体薄膜 54 をエッチングにより除去した後、反強誘電性薄膜 53 上に上部電極 61 を、強誘電性・圧電性薄膜 5 上に上部電極 62 をそれぞれ形成する [図 9 (D)]。

【0046】図 9 (E) において、Si 基板 2 の下面は、ダイボンド剤 10 によりパッケージ 11 の底面に接着され、パッケージ 11 の上部は蓋 13 により封止されている。パッケージ 11 内には、外部と連絡する外部接続端子 A、B、C が存在し、これらは、ワイヤ 12 を介して上部電極 61、下地電極 4、上部電極 62 とそれぞれ電氣的に接続している。この VCO においても、可変容量素子と発振素子である圧電バルク振動素子とは、直列に接続されている。

【0047】この VCO において、パッケージ 11 の外部端子を利用し、Sawyer-Tower 法に基づいて、可変容量素子の上部電極 61 と下地電極 4 との間に最大振幅 5V 程度の低周波電圧を印加したところ、図 10 に示す蓄積電荷量の履歴曲線 14 が得られた。この履歴曲線は、二重ヒステリシス曲線となっている。また、この履歴曲線

14 の傾きから、容量の印加電圧依存性曲線を得た。この可変容量素子は、低周波電圧や直流電圧を印加した後も、履歴曲線や容量の経時変化が小さく、十分に実用に耐えることが判明した。

【0048】この VCO の動作は、図 4 を用いて説明した第 1 実施例の動作と同じとなる。この VCO の圧電バルク振動素子は、第 1 実施例と同一である。この VCO において、可変容量素子にその飽和電圧である 5V を印加した後、印加電圧 (制御電圧) を 5V から 2.5V ままで変化させて VCO の AC 間におけるインピーダンスの絶対値と虚数部を測定すると、図 8 と同様な結果が得られた。図 4 に示す能動回路のリアクタンス  $X_c$  を一般的な値である  $50\Omega$  に設定して、発振条件を満たす周波数を図 8 から見積もると、規格化周波数可変幅が約 1% となることがわかる。

【0049】なお、強誘電性・圧電性薄膜 5 として、2 重ヒステリシス曲線をもつ強誘電体である  $BaTiO_3$  薄膜を用いた場合でも、可変容量素子として同様な機能が得られる。

【0050】上記第 1、第 2 および第 3 実施例では、小型化および製造工程の簡略化を考慮して、1 枚の Si 基板を可変容量素子と発振素子との両方で利用しているが、各素子を別々の Si 基板上に形成してもよい。また、下地電極も両素子で共通であるが、下地電極を素子ごとに独立して設け、両素子をワイヤなどにより直列接続する構成としてもよい。また、上記各実施例では、強誘電性・圧電性薄膜を PZT から構成したが、このほか、例えば特開平 9-321362 号公報に記載されている、c 軸配向した Pb 含有ペロブスカイト強誘電性薄膜を用いることもできる。

【0051】第 1 実施例および第 3 実施例では、ダイヤフラムの厚さを  $20\mu m$  としたが、機械的強度を保持できる範囲であれば、さらに薄くしてもよい。また、ダイヤフラム上に圧電性薄膜を形成した後、ダイヤフラムを裏面側からエッチングして Si を完全に除去してもよい。

#### 【0052】第 4 実施例

図 11 に、発振素子として弾性表面波共振器を利用した VCO の実施例を示す。

【0053】この VCO は、可変容量素子と、弾性表面波共振器とを有し、これらがパッケージ 11 内に並んで配置されている。

【0054】可変容量素子は、Si 基板 2 を有し、この上に、酸化シリコン層／酸化ジルコニウム層／チタン酸バリウム層からなるパッファ層 3、白金からなる下地電極 4、PZT からなる強誘電性・圧電性薄膜 5 および Au からなる上部電極 61 をこの順で有する。上部電極 61 の寸法は、 $35\mu m$  角である。ダイヤフラム 1 および強誘電性・圧電性薄膜 5 は、第 1 実施例と同様にして形成した。



【0055】弾性表面波共振器は、 $\text{KNbO}_3$ 単結晶基板21を有し、この上に、楕形電極63およびストリップ反射器（図示せず）を有する。楕形電極63の対数、ストリップ反射器の本数および両者の中心間距離は、第2実施例と同じである。

【0056】Si基板2と $\text{KNbO}_3$ 単結晶基板21とは、ダイボンド剤10によりパッケージ11底面に接着され、パッケージ11の上部は蓋13により封止されている。パッケージ11内には、外部と連絡する外部接続端子A、B、Cが存在し、これらは、ワイヤ12を介して上部電極61、下地電極4、楕形電極63の出力電極パッドとそれぞれ電気的に接続している。また、楕形電極63の入力電極パッドは、ワイヤ12を介して下地電極4に接続している。このVCOにおいても、可変容量素子と発振素子である弾性表面波共振器とは、直列に接続されている。

【0057】このVCOにおいて、可変容量素子は第2実施例における可変容量素子と同一である。したがって、蓄積電荷量の履歴曲線および容量の印加電圧依存性も同一である。また、可変容量素子と弾性表面波共振器とを直列に接続したVCOの動作は、図4を用いて説明した第1実施例の動作と同じとなる。

【0058】そこで、可変容量素子にその飽和電圧である4Vを印加した後、印加電圧（制御電圧）を3.5V、1.3V、-0.5Vに設定して、VCOのAC間におけるインピーダンスの絶対値および虚数部を測定した。結果を図12に示す。図12において、曲線87、88、89は、印加電圧がそれぞれ3.5V、1.3V、-0.5Vのときのインピーダンスの絶対値を表し、曲線90、91、92は、印加電圧がそれぞれ3.5V、1.3V、-0.5Vのときのインピーダンスの虚数部を表す。

【0059】ここで、図4における能動回路のリアクタンス $X_c$ を一般的な値である50Ωに設定し、印加電圧を3.5Vから-0.5Vまで変化させたととき、発振条件を満たす周波数を図12から見積もると、規格化周波数可変幅が約1.2%となることがわかる。

#### 【0060】可変容量素子の各部の構成

次に、本発明のVCOにおける可変容量素子の各部の構成を、より詳細に説明する。

#### 【0061】基板

本発明で用いる基板の材料は特に限定されないが、好ましくは単結晶を用いる。具体的には、例えば、マグネシア、チタン酸ストロンチウム、サファイア、ジルコニア、安定化ジルコニア、ニオブ酸リチウム、タンタル酸リチウム等の絶縁体や、ガリウム砒素、シリコン等の半導体などのいずれを用いてもよいが、好ましくはSi単結晶を用いる。特に、Si単結晶の(100)面が基板表面となるように用いた場合、特性の優れた機能性エピタキシャル膜を形成できる。また、Siは半導体素子に

汎用されているため、本発明のVCOを他の半導体素子と複合化する場合にも好適である。また、他の半導体素子と組み合わせて使用する場合でも、基板の熱膨張係数が一致するので好ましい。例えば $\text{MgO}$ 基板の熱膨張係数はSiと一桁異なるので、このような用途に不適当である。また、Siは、比較的安価である。

#### 【0062】強誘電性薄膜、反強誘電性薄膜

本発明のVCOでは、IMT2000システム等の携帯電話等で使用される数ボルト程度の電圧において、自発分極変化による誘電率変化を利用して可変容量素子を動作させるために、強誘電体および反強誘電体として薄膜を用いる。例えば、バルク単結晶を用いる場合、加工技術の限度から厚さが200μm以上となるため、数ボルト程度の電圧では自発分極変化による誘電率変化は利用できない。本発明において可変容量素子に用いる強誘電性薄膜および反強誘電性薄膜の厚さは、数ボルト程度の電圧を印加したときに自発分極変化による誘電率変化が利用できるように、すなわち、例えば前記飽和電圧が1~9V程度となるように適宜設定すればよいが、通常、0.1~20μmとすることが好ましい。

【0063】本発明において、少なくとも可変容量素子に用いる強誘電性薄膜および反強誘電性薄膜は、以下に説明するエピタキシャル膜であることが好ましい。Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 36 (1997) pp. 6069-6072に記載されているように、従来の強誘電性薄膜、例えば、ゾルゲル法で作製したPZT薄膜は、直流電圧あるいは低周波電圧印加後の誘電率や圧電特性が、印加電圧の大きさによって異なり、再現性に問題があるが、以下に説明するエピタキシャル膜では、前記実施例に示されるように、誘電率や圧電特性が直流電圧あるいは低周波電圧印加によって影響を受けず、良好な再現性が得られる。

【0064】以下、エピタキシャル膜である強誘電性薄膜および反強誘電性薄膜を、機能性エピタキシャル膜と総称する。

【0065】機能性エピタキシャル膜に用いる材料は特に限定されず、強誘電性または反強誘電性を有するものから適宜選択すればよいが、例えば以下の材料が好適である。

【0066】(A)ペロブスカイト型材料： $\text{BaTiO}_3$ ； $\text{PbTiO}_3$ 、希土類元素含有チタン酸鉛、PZT（ジルコンチタン酸鉛）、PLZT（ジルコンチタン酸ランタン鉛）等のPb系ペロブスカイト化合物；Bi系ペロブスカイト化合物など。以上のような単純、複合、層状の各種ペロブスカイト化合物。

【0067】(B)タングステンブロンズ型材料：SBN（ニオブ酸ストロンチウムバリウム）、PBN（ニオブ酸鉛バリウム）等のタングステンブロンズ型酸化物など。

【0068】(C)YMnO<sub>3</sub>系材料：希土類元素（ScおよびYを含む）とMnとOとを含み、六方晶系YM

$n\text{O}_3$ 構造をもつ酸化物など。例えば、 $\text{YMnO}_3$ 、 $\text{HoMnO}_3$ 等。

【0069】以下、これらの材料について、より詳細に説明する。

【0070】ペロブスカイト型材料のうち、 $\text{BaTiO}_3$ やPb含有ペロブスカイト化合物などは、一般に式 $\text{ABO}_3$ で表される。ここで、AおよびBは各々陽イオンを表す。AはCa、Ba、Sr、Pb、K、Na、Li、LaおよびCdから選ばれた1種以上であることが好ましく、BはTi、Zr、TaおよびNbから選ばれた1種以上であることが好ましい。

【0071】こうしたペロブスカイト型化合物における原子比A/Bは、好ましくは0.8~1.3であり、より好ましくは0.9~1.2である。

【0072】A/Bをこのような範囲にすることによって、誘電体の絶縁性を確保することができ、また結晶性を改善することが可能になるため、誘電体特性または強誘電特性を改善することができる。これに対し、A/Bが0.8未満では結晶性の改善効果が望めなくなり、またA/Bが1.3をこえると均質な薄膜の形成が困難になっ

てしまう。

【0073】このようなA/Bは、成膜条件を制御することによって実現する。また、 $\text{ABO}_3$ におけるOの比率は、3に限定されるものではない。ペロブスカイト材料によっては、酸素欠陥または酸素過剰で安定したペロブスカイト構造を組むものがあるので、 $\text{ABO}_x$ において、xの値は、通常、2.7~3.3程度である。なお、A/Bは、蛍光X線分析法から求めることができる。

【0074】本発明で用いる $\text{ABO}_3$ 型のペロブスカイト化合物としては、 $\text{A}^{1+}\text{B}^{5+}\text{O}_3$ 、 $\text{A}^{2+}\text{B}^{4+}\text{O}_3$ 、 $\text{A}^{3+}\text{B}^{3+}\text{O}_3$ 、 $\text{A}_x\text{BO}_3$ 、 $\text{A}(\text{B}'^{0.67}\text{B}''^{0.33})\text{O}_3$ 、 $\text{A}(\text{B}'^{0.33}\text{B}''^{0.67})\text{O}_3$ 、 $\text{A}(\text{B}_{0.5}^{+3}\text{B}_{0.5}^{+5})\text{O}_3$ 、 $\text{A}(\text{B}_{0.5}^{+2}\text{B}_{0.5}^{+6})\text{O}_3$ 、 $\text{A}(\text{B}_{0.5}^{+1}\text{B}_{0.5}^{+7})\text{O}_3$ 、 $\text{A}^{3+}(\text{B}_{0.5}^{+2}\text{B}_{0.5}^{+4})\text{O}_3$ 、 $\text{A}(\text{B}_{0.25}^{+1}\text{B}_{0.75}^{+5})\text{O}_3$ 、 $\text{A}(\text{B}_{0.5}^{+3}\text{B}_{0.5}^{+4})\text{O}_{2.75}$ 、 $\text{A}(\text{B}_{0.5}^{+2}\text{B}_{0.5}^{+5})\text{O}_{2.75}$ 等のいずれであってもよい。

【0075】具体的には、PZT、PLZT等のPb系ペロブスカイト化合物、 $\text{CaTiO}_3$ 、 $\text{BaTiO}_3$ 、 $\text{PbTiO}_3$ 、 $\text{KTaO}_3$ 、 $\text{BiFeO}_3$ 、 $\text{NaTaO}_3$ 、 $\text{SrTiO}_3$ 、 $\text{CdTiO}_3$ 、 $\text{KNbO}_3$ 、 $\text{LiNbO}_3$ 、 $\text{LiTaO}_3$ 、およびこれらの固溶体等である。

【0076】なお、上記PZTは、 $\text{PbZrO}_3$ - $\text{PbTiO}_3$ 系の固溶体である。また、上記PLZTは、PZTにLaがドーピングされた化合物であり、 $\text{ABO}_3$ の表記に従えば、 $(\text{Pb}_{0.89}\sim 0.91}\text{La}_{0.11}\sim 0.09})\text{(Zr}_{0.65}\text{Ti}_{0.35})\text{O}_3$ で示される。

【0077】また、層状ペロブスカイト化合物のうちBi系層状化合物は、一般に式 $\text{Bi}_2\text{A}_{m-1}\text{B}_m\text{O}_{3m+3}$

で表わされる。上記式において、mは1~5の整数、Aは、Bi、Ca、Sr、Ba、Pb、Na、Kおよび希土類元素（ScおよびYを含む）のいずれかであり、Bは、Ti、TaおよびNbのいずれかである。具体的には、 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 、 $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ 、 $\text{SrBi}_2\text{Nb}_2\text{O}_9$ などが挙げられる。本発明では、これらの化合物のいずれを用いてもよく、これらの固溶体を用いてもよい。

【0078】本発明に用いることが好ましいペロブスカイト型化合物は、チタン酸塩ないしチタン酸塩含有ペロブスカイト型化合物、例えば $\text{BaTiO}_3$ 、 $\text{SrTiO}_3$ 、PLZT、PZT、 $\text{CaTiO}_3$ 、 $\text{PbTiO}_3$ （チタン酸鉛）、希土類元素含有チタン酸鉛等であり、より好ましいものは $\text{BaTiO}_3$ 、 $\text{SrTiO}_3$ 、PZT、 $\text{PbTiO}_3$ 、希土類元素含有チタン酸鉛であり、特に好ましいものは、R（Rは、Pr、Nd、Eu、Tb、Dy、Ho、Yb、Y、Sm、Gd、ErおよびLaから選択された少なくとも1種の希土類元素）、Pb、TiならびにOを含有する希土類元素含有チタン酸鉛である。

【0079】このような希土類元素含有チタン酸鉛としては、元素の構成比が

$$(\text{Pb} + \text{R}) / \text{Ti} = 0.8 \sim 1.3, \\ \text{Pb} / (\text{Pb} + \text{R}) = 0.5 \sim 0.99$$

の範囲にあるものが好ましい。この組成の希土類元素含有チタン酸鉛は、特開平10-17394号公報に開示されている。

【0080】タングステンブロンズ型材料としては、強誘電体材料集のLandolt-Boernstein Vol. 16記載のタングステンブロンズ型材料が好ましい。具体的には、 $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{Nb}_2\text{O}_6$ 、 $(\text{Ba}, \text{Pb})\text{Nb}_2\text{O}_6$ 、 $\text{PbNb}_2\text{O}_6$ 、 $\text{PbTa}_2\text{O}_6$ 、 $\text{BaTa}_2\text{O}_6$ 、 $\text{PbNb}_4\text{O}_{11}$ 、 $\text{SrNb}_2\text{O}_6$ 、 $\text{BaNb}_2\text{O}_6$ 等やこれらの固溶体が好ましく、特に、 $\text{SBN} \{ (\text{Ba}, \text{Sr})\text{Nb}_2\text{O}_6 \}$ や $\text{PBN} \{ (\text{Ba}, \text{Pb})\text{Nb}_2\text{O}_6 \}$ が好ましい。

【0081】 $\text{YMnO}_3$ 系材料は、化学式 $\text{RMnO}_3$ で表せる。Rは希土類元素（ScおよびYを含む）から選ばれた1種以上であることが好ましい。 $\text{YMnO}_3$ 系材料における原子比R/Mnは、好ましくは0.8~1.2であり、より好ましくは0.9~1.1である。このような範囲にすることにより、絶縁性を確保することができ、また結晶性を改善することが可能になるため、強誘電特性を改善することができる。これに対し、原子比R/Mnが0.8未満または1.2を超える範囲では、結晶性が低下する傾向がある。また特に、原子比R/Mnが1.2を超える範囲では、強誘電性が得られず、常誘電的特性になる傾向があり、分極を利用した素子への応用が不可能になってくることがある。このような範囲のR/Mnは、成膜条件を制御することによって実現でき

る。なお、 $R/Mn$ は、蛍光X線分析により求めることができる。 $YMnO_3$ 系材料の比誘電率は、バルクで10～50程度、薄膜で10～100程度である。

【0082】本発明に用いることが好ましい $YMnO_3$ 系材料は、結晶構造が六方晶系のものである。

【0083】 $YMnO_3$ 系材料は、六方晶系の結晶構造を持つものと斜方晶系の結晶構造を持つものが存在する。強誘電性を得るためには、六方晶系の結晶材料とする必要がある。具体的には、組成が実質的に $YMnO_3$ 、 $HoMnO_3$ 、 $ErMnO_3$ 、 $YbMnO_3$ 、 $TmMnO_3$ 、 $LuMnO_3$ であるものか、これらの固溶体などである。

【0084】機能性エピタキシャル膜は、ペロブスカイト結晶構造を有し、少なくとも(001)配向を有することが好ましい。(001)配向では、 $\langle 001 \rangle$ 軸が機能性エピタキシャル膜の面内方向に垂直であり、ペロブスカイト系の結晶構造を持つ $PbTiO_3$ 系材料の多くは強誘電性が $\langle 001 \rangle$ 軸で得られるので、(001)面が膜面内に平行である(001)単一配向膜であることがより好ましい。

【0085】なお、本明細書における単一配向膜とは、基板表面と平行に目的とする結晶面がそろっている結晶化膜のことを意味する。具体的には、例えば、(001)単一配向膜、すなわちc面単一配向膜は、膜の $2\theta - \theta$  X線回折において、(00L)面以外の反射強度が(00L)面反射の最大ピーク強度の10%以下、好ましくは5%以下のものである。なお、本明細書において(00L)は、(001)や(002)などの等価な面を総称する表示である。

【0086】本明細書におけるエピタキシャル膜とは、基板表面と平行に目的とする結晶面がそろっている結晶化膜であって、膜面内をX-Y面とし、膜厚方向をZ軸としたとき、結晶がX軸、Y軸およびZ軸方向にともにそろって配向しているものである。具体的には、第一に、上記した単一配向膜である必要がある。第二に、RHEED評価でスポットまたはストリークパターンを示す必要がある。これらの条件を満足すれば、エピタキシャル膜といえる。なお、RHEEDとは、反射高速電子線回折(Reflection High Energy Electron Diffraction)であり、RHEED評価は、膜面内における結晶軸の配向の指標である。

【0087】ただし、本発明では、(100)面が膜面内に平行となっている(100)配向の結晶が(001)配向結晶に混在していてもよい。(100)配向結晶は90°ドメインを形成することがあり、この場合、自発分極をわずかに減少させるが、大きな障害にはならない。また、90°ドメインが形成されると、薄膜内の応力が減少するので、強誘電体特性の向上に効果的であることもある。X線回折におけるピーク強度比は、通常、(100)/(001)が3以下であることが好ま

しい。

【0088】なお、(001)単一配向でなくても、混在する結晶が(100)配向である場合には、本明細書において定義するエピタキシャル膜に包含されるものとする。この場合のエピタキシャル膜とは、第一に、X線回折による測定を行ったとき、目的とするふたつの面以外のものの反射のピーク強度が目的とする面の最大ピーク強度の10%以下、好ましくは5%以下である必要がある。具体的には、膜の $2\theta - \theta$  X線回折において、(00L)面および(H00)面以外のピーク強度が、(00L)面または(H00)面の最大ピーク強度の10%以下、好ましくは5%以下である。第二に、RHEED評価でスポットまたはストリークパターンを示す必要がある。これらの条件を満足すれば、本明細書において定義するエピタキシャル膜であることとする。なお、本明細書において(H00)は、(100)や(200)などの等価な面を総称する表示である。

【0089】Si(100)基板を用いる場合の機能性エピタキシャル膜とSi(100)基板との好ましい結晶軸方位関係は、以下の通りである。なお、Siは立方晶である。ペロブスカイト構造の機能性エピタキシャル膜が(001)単一配向である場合、ペロブスカイト[100]//Si[010]である。また、機能性エピタキシャル膜が(001)配向と(100)配向とが混在したものである場合、ペロブスカイト(001)配向結晶についてはペロブスカイト[100]//Si[010]であり、ペロブスカイト(100)配向結晶についてはペロブスカイト[001]//Si[010]である。すなわち、機能性エピタキシャル膜とSi基板とは、面内に存在する軸同士も平行であることが好ましい。

#### 【0090】バッファ層

基板と機能性エピタキシャル膜との間には、前記実施例に示すように、バッファ層を設けることが好ましい。また、下地電極を設ける場合には、バッファ層は下地電極と基板との間に設けることが好ましい。バッファ層は、以下に説明する第1バッファ層および/または第2バッファ層を含むことが好ましい。

【0091】(第1バッファ層)第1バッファ層は、前記した式 $ABO_3$ で表されるペロブスカイト結晶構造を有する。Aとしては、Ca、Ba、Sr、Pb、K、Na、Li、LaおよびCdの1種以上、特にBaまたはSrが好ましく、Bとしては、Ti、Zr、TaおよびNbの1種以上、特にTiが好ましい。すなわち、第1バッファ層は、チタン酸バリウムまたはチタン酸ストロンチウムを主成分とすることが好ましい。

【0092】第1バッファ層における原子比A/Bは、好ましくは0.8～1.3、より好ましくは0.9～1.2である。A/Bが0.8未満では結晶性の改善効果が望めなくなり、またA/Bが1.3を超えると均質

な薄膜の形成が困難になってしまう。 $A/B$ の組成比は、蛍光X線分析により求めることができる。 $ABO_3$ におけるOの比率は、前記したように3に限らず、2.7~3.3の範囲にあればよい。

【0093】第1パフファ層は、正方晶であるときは(001)単一配向、すなわち基板表面と平行にc面が単一に配向したものであることが好ましく、立方晶であるときは(100)単一配向、すなわち基板表面と平行にa面が単一に配向したものであることが好ましく、いずれの場合でもエピタキシャル膜であることがより好ましい。また、第1パフファ層とSi(100)基板との結晶方位関係は、正方晶 $[100]//Si[010]$ または立方晶 $[010]//Si[010]$ であることが好ましい。すなわち、パフファ層と基板とは、面内において軸同士が平行であることが好ましい。このような積層構造は、さらにこの構造上に形成される下地電極や機能性エピタキシャル膜の結晶性を向上させて、これらを単一配向膜やエピタキシャル膜として形成するのに効果的である。第1パフファ層は機能性エピタキシャル膜との格子整合性が良好であるため、結晶性の高い機能性エピタキシャル膜が得られる。

【0094】(第2パフファ層)第1パフファ層と第2パフファ層とを設ける場合、第2パフファ層は、基板と第1パフファ層との間に設ける。第2パフファ層は、以下に説明する酸化ジルコニウム系薄膜から構成するか、これと、以下に説明する希土類酸化物系薄膜とから構成する。なお、両薄膜を設ける場合、希土類酸化物系薄膜は、機能性エピタキシャル膜側に設けられる。

【0095】酸化ジルコニウム系薄膜は、酸化ジルコニウムを主成分とするか、希土類元素(ScおよびYを含む)により安定化された酸化ジルコニウム(安定化ジルコニア)を主成分とする。この薄膜を設けることにより、その上に設けられる第1パフファ層や機能性エピタキシャル膜の剥離を防止できる。また、この薄膜は、チタン酸バリウム等からなる第1パフファ層との格子整合性がよいため、結果として結晶性の高い機能性エピタキシャル膜を形成できる。

【0096】酸化ジルコニウムおよび安定化ジルコニアは、 $Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}$ (RはScおよびYを含む希土類元素であり、 $x=0\sim0.75$ 、 $\delta=0\sim0.5$ である)で表わされる組成のものが好ましい。 $x$ および $\delta$ の限定理由については、後述する。Rとしては、Pr、Ce、Nd、Gd、Tb、Dy、HoおよびErから選択される少なくとも1種であることが好ましい。

【0097】酸化ジルコニウム系薄膜は、単一の結晶配向を有していることが望ましい。これは、複数の結晶面を有する薄膜においては粒界が存在するため、その上の第1パフファ層や機能性エピタキシャル膜のエピタキシャル成長が不可能になるためである。具体的には、正方晶または単斜晶であるときは(001)単一配向、立方

晶であるときは(100)単一配向であることが好ましく、いずれの場合でもエピタキシャル膜であることがより好ましい。このような良好な結晶性の酸化ジルコニウム系薄膜が形成できれば、粒界による物理量の攪乱等がなくなり、酸化ジルコニウム系薄膜上に良質の第1パフファ層、下地電極および機能性エピタキシャル膜が得られる。

【0098】Si(100)基板表面に、第2パフファ層( $Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}$ )および第1パフファ層( $BaTiO_3$ )が順次積層されているとき、これらの結晶方位関係は、 $BaTiO_3(001)//Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}(001)//Si(100)$ 、かつ $BaTiO_3[100]//Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}[100]//Si[010]$ であることが好ましい。これは、第2パフファ層および第1パフファ層がいずれも正方晶である場合であるが、これらの薄膜が立方晶である場合でも、面内において軸同士が平行であることが好ましいという点では同様である。

【0099】YBCOなどの従来例からの類推では、(001)配向の $BaTiO_3$ エピタキシャル膜を得ようとするとき、その結晶方位関係は、 $BaTiO_3(001)//Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}(001)//Si(100)$ 、かつ $BaTiO_3[110]//Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}[100]//Si[010]$ となり、 $BaTiO_3$ の単位格子は、 $Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}$ の格子に対してc面内で $45^\circ$ 回転して格子の整合がとれてエピタキシャル成長すると推定される。しかし、本発明者らの実験によると、そのような結晶方位関係は構成困難であり、 $BaTiO_3(001)//Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}(001)//Si(100)$ 、かつ $BaTiO_3[100]//Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}[100]//Si[010]$ の関係でエピタキシャル成長することを見いだした。 $Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}$ 膜のa軸は $0.52\text{nm}$ であり、 $BaTiO_3$ 膜のa軸は $0.40\text{nm}$ であるので、 $45^\circ$ 面内で回転して格子整合する $BaTiO_3[110]//Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}[100]//Si[010]$ の関係では、ミスフィットが8.4%になる。これに対し、本発明者らによる実験において見いだされた $BaTiO_3[100]//Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}[100]//Si[010]$ では、 $BaTiO_3$ 結晶のa面と $Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}$ 結晶のa面とは回転せずにそのまま整合し、この際、 $Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}$ 3格子( $0.52\times 3=1.56\text{[nm]}$ )に対し、 $BaTiO_3$ 4格子( $0.40\times 4=1.60\text{[nm]}$ )が整合する。このとき、ミスフィットは2.6%であり、よくマッチングする。このように、 $BaTiO_3[100]//Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}[100]//Si[010]$ の関係を利用することにより、(001)配向のエピタキシャル $BaTiO_3$ 膜、すなわち、結晶性に優れた第1パフファ層を得ることができる。

【0100】 $ZrO_2$ は高温から室温にかけて立方晶→

正方晶→単斜晶と相転移を生じる。立方晶を安定化するために希土類元素を添加したものが、安定化ジルコニアである。 $Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}$ 膜の結晶性は $x$ の範囲に依存する。Jpn. J. Appl. Phys. 27(8)L1404-L1405(1988)に報告されているように、 $x$ が0.2未満である組成域では正方晶または単斜晶の結晶になる。これまで、 $x$ が0.2以上の立方晶領域では単一配向のエピタキシャル膜が得られている。ただし、 $x$ が0.75を超える領域では、立方晶ではあるが、例えば(100)単一配向は得られず、(111)配向の結晶が混入する。一方、正方晶または単斜晶となる領域では、J. Appl. Phys. 58(6)2407-2409(1985)にも述べられているように、得ようとするもの以外の配向面が混入し、単一配向のエピタキシャル膜は得られていない。

【0101】したがって、結晶配向の点からは、 $Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}$ において $x$ は0.2~0.75であることが好ましい。この場合の $x$ のより好ましい範囲は、0.2~0.50である。酸化ジルコニウム系薄膜がエピタキシャル膜であれば、その上に形成される第1バッファ層、下地電極、機能性エピタキシャル膜をエピタキシャル成長させやすい。

【0102】酸化ジルコニウム系薄膜を構成する安定化ジルコニアを含む希土類元素は、基板の格子定数および酸化ジルコニウム系薄膜上に設けられる薄膜の格子定数と、酸化ジルコニウム系薄膜の格子定数とを好ましくマッチングさせるために、その種類および添加量が選択される。例えば、上記した格子定数0.52nmの $Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}$ は、 $R$ が $Y$ であり、 $x$ が0.3のものである。 $R$ の種類を固定したまま $x$ を変更すれば格子定数を変えることができるが、 $x$ だけの変更ではマッチングの調整可能領域が狭い。ここで、例えば $Y$ に替えて $Pr$ を用いると、格子定数を大きくすることが可能であり、第1バッファ層の $BaTiO_3$ 結晶とのマッチングを最適化することができる。

【0103】なお、酸素欠陥を含まない酸化ジルコニウムは、化学式 $ZrO_2$ で表わされるが、希土類元素を添加した酸化ジルコニウムは、添加した希土類元素の種類、量および価数により酸素の量が変化し、 $Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}$ における $\delta$ は、通常、上記した範囲となる。

【0104】 $Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}$ において $x$ が0.2未満である領域、特に、酸素を除く構成元素中における $Zr$ の比率が93mol%を超える高純度の組成域では、上述したように結晶性が良好とはならず、また、良好な表面性も得られていなかった。しかし、本発明者らが検討を重ねた結果、例えば前記特開平10-17394号公報に記載されている製造方法を適用することにより、上記した単一配向、さらにはエピタキシャル成長が可能となり、表面性も良好となることがわかった。高純度の $ZrO_2$ 膜には、以下に述べるようなメリットがある。

【0105】酸素を除く構成元素中における $Zr$ の比率

が高いほど、すなわち $ZrO_2$ の純度が高いほど絶縁抵抗も高くなり、リーク電流も小さくなることから、高純度の $ZrO_2$ 膜は絶縁特性を必要とする場合には好ましい。また、金属-絶縁体-半導体構造(MIS構造)において $ZrO_2$ を絶縁体として用いた場合、YSZ( $Y$ 安定化ジルコニア)を絶縁体として用いた場合にみられるC-V特性のヒステリシスがなくなるので、MIS素子として界面特性が優れる。この理由としては、Si基板と酸化ジルコニウム系薄膜との間で熱膨張係数の違いにより発生する応力が $ZrO_2$ の相転移により緩和されること、および、 $ZrO_2$ の酸素欠陥が少ないことが考えられる。YSZは相転移がないため応力が緩和されず、また、希土類元素を添加しているために酸素欠陥が多い。

【0106】したがって、良好な結晶性および表面性が得られる場合には、酸化ジルコニウム系薄膜中の酸素を除く構成元素中における $Zr$ の比率は高いほど好ましく、具体的には、好ましくは93mol%超、より好ましくは95mol%以上、さらに好ましくは98mol%以上、最も好ましくは99.5mol%以上である。なお、酸素および $Zr$ を除く構成元素は、通常、希土類元素やPなどである。 $Zr$ の比率の上限は、現在のところ99.99mol%程度である。また、現在の高純度化技術では $ZrO_2$ と $HfO_2$ との分離は難しいので、 $ZrO_2$ の純度は、通常、 $Zr+Hf$ での純度を指している。したがって、本明細書における $ZrO_2$ の純度は、 $Hf$ と $Zr$ とを同元素とみなして算出された値であるが、 $HfO_2$ は本発明における酸化ジルコニウム系薄膜において $ZrO_2$ と全く同様に機能するため、問題はない。

【0107】なお、第2バッファ層を形成する場合、第2バッファ層中の酸素がSi単結晶基板の表面付近に拡散し、基板表面付近が浅く(例えば5nm程度以下)酸化されて $SiO_2$ などの酸化層が形成されることがある。また、成膜の方法によっては、第2バッファ層形成時にSi基板表面にSi酸化物層が残留する場合がある。前記実施例において、3層構造のバッファ層の最も基板側に存在する酸化シリコン層は、このようにして形成されたものである。

【0108】次に、希土類酸化物系薄膜について説明する。

【0109】上記したように、第2バッファ層として上記した安定化ジルコニアを用いたとき、C-V特性にヒステリシスがみられ、この点において $ZrO_2$ 高純度膜に劣る。この場合、酸化ジルコニウム系薄膜上に希土類酸化物系薄膜を積層することにより、C-V特性のヒステリシスをなくすることができる。また、希土類酸化物系薄膜を積層することにより、機能性エピタキシャル膜との間での格子整合のマッチングがより良好となる。

【0110】なお、希土類酸化物系薄膜を酸化ジルコニウム系薄膜の上に形成するのは、希土類酸化物系薄膜だ

けでは(001)単一配向や(100)単一配向の膜が形成できず、立方晶の(111)配向の膜となってしまうからである。

【0111】希土類酸化物系薄膜は、Y、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、YbおよびLuの少なくとも1種、特に、Ce、Pr、Nd、Gd、Tb、Dy、HoおよびErの少なくとも1種を含有する希土類酸化物から実質的に構成されていることが好ましい。なお、2種以上の希土類元素を用いるとき、その比率は任意である。

【0112】希土類酸化物系薄膜が積層されている場合、酸化ジルコニウム系薄膜は、元素分布が均一な膜であってもよく、膜厚方向に組成が変化する傾斜構造膜であってもよい。傾斜構造膜とする場合、基板側から希土類酸化物系薄膜側にかけて、酸化ジルコニウム系薄膜中の希土類元素含有率を徐々にまたは段階的に増大させると共に、Zr含有率を徐々にまたは段階的に減少させる。このような傾斜構造膜とすることにより、酸化ジルコニウム系薄膜と希土類酸化物系薄膜との間の格子のミスフィットが小さくなるか、あるいは存在しなくなり、希土類酸化物系薄膜を高結晶性のエピタキシャル膜とすることが容易となる。

【0113】なお、希土類酸化物系薄膜に添加する希土類元素は、酸化ジルコニウム系薄膜に添加する希土類元素と同一のものをを用いることが好ましい。

【0114】酸化ジルコニウム系薄膜および希土類酸化物系薄膜には、特性改善のために添加物を導入してもよい。例えば、これらの薄膜にCaやMgなどのアルカリ土類元素をドーピングすると、膜のピンホールが減少し、リークを抑制することができる。また、AlおよびSiは、膜の抵抗率を向上させる効果がある。さらに、Mn、Fe、Co、Niなどの遷移金属元素は、膜中において不純物による準位(トラップ準位)を形成することができ、この準位を利用することにより導電性の制御が可能になる。

#### 【0115】下地電極

基板と機能性エピタキシャル膜との間に、機能性エピタキシャル膜に密着して設けられる下地電極は、機能性エピタキシャル膜用の電極および機能性エピタキシャル膜のデバイス応用に必要な構造を構成するための下部電極として機能する。

【0116】下地電極は金属から構成されることが好ましいが、Inを含む酸化物や導電性ペロブスカイト酸化物であってもよく、金属膜と酸化物膜とを積層した構成としてもよい。金属としては、Pt、Ir、Os、Re、Pd、RhおよびRuの少なくとも1種を含有する金属単体や合金が好ましい。Inを含む酸化物または導電性ペロブスカイト酸化物としては、例えば、In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Snドープ)、(R, Sr)CoO<sub>3</sub>、(R, Sr, Ca)RuO<sub>3</sub>、(R, Sr)RuO

3、SrRuO<sub>3</sub>、(R, Sr)MnO<sub>3</sub>、またはこれらの関連化合物が好ましい。なお、これらの化合物において、RはScおよびYを含む希土類元素である。

【0117】下地電極は第1バッファ層と同様に、正方晶であるときは(001)単一配向、立方晶であるときは(100)単一配向であることが好ましく、いずれの場合でもエピタキシャル膜であることがより好ましい。また、下地電極とSi(100)基板との結晶方位関係は、正方晶[100]//Si[010]または立方晶[010]//Si[010]であることが好ましい。すなわち、薄膜と基板とは、面内において軸同士が平行であることが好ましい。このような積層構造は、さらにこの構造上に形成される機能性エピタキシャル膜の結晶性を向上させて、単一配向膜やエピタキシャル膜として形成するのに効果的である。下地電極は機能性エピタキシャル膜との格子整合性が良好であるため、結晶性の高い機能性エピタキシャル膜が得られる。

【0118】下地電極は、バルクでの比抵抗が $10^{-5} \sim 10^{-2} \Omega \text{cm}$ であることが好ましい。また、薄膜としての比抵抗も $10^{-5} \sim 10^{-2} \Omega \text{cm}$ であることが好ましい。なお、下地電極は、超電導材料から構成されていてもよい。

#### 【0119】各薄膜、下地電極の結晶性、表面性および厚さ

下地電極やバッファ層は、その上に形成される薄膜の結晶性を向上させるために、結晶性が良好でかつ表面が平坦であることが好ましい。

【0120】薄膜の結晶性は、X線回折における反射ピークのロッギングカーブの半値幅や、RHEEDによる像のパターンで調べることができる。また、表面性は、RHEED像のストリーク性、およびAFM(原子間力顕微鏡)で測定した表面粗さ(十点平均粗さ)で調べることができる。

【0121】下地電極の厚さは、通常、50~500nmとすることが好ましい。また、第1バッファ層の厚さは5~200nm程度、第2バッファ層の厚さは5~50nm程度とすることが好ましい。

#### 【0122】形成方法

機能性エピタキシャル膜、バッファ層および下地電極の形成には、蒸着法、MBE法、RFマグネトロンスパッタ法などを用いることが好ましく、特に、前記特開平10-17394号公報に記載された方法を用いることが好ましい。

#### 【0123】

【発明の効果】本発明では、蓄積電荷量が印加電圧に対して履歴を示す強誘電性薄膜または反強誘電性薄膜を一对の電極で挟んで可変容量素子とし、この可変容量素子に直列に、発振素子(圧電バルク振動素子または弾性表面波共振器)を接続することにより、VCOを構成する。すなわち、本発明は、上記可変容量素子をバラクタ

ダイオードの代替として使用するという、全く新しい発想に基づくものである。バラクタダイオードは、2GHz程度の高周波領域において、抵抗成分が増大し、Qが大幅に低くなり、C/Nが低下するという問題があるが、本発明の可変容量素子を用いることにより、これらの問題が解決される。

【0124】本発明では、可変容量素子において強誘電性材料および反強誘電性材料を薄膜化して用いるので、数ボルトの電圧で動作させることができ、かつ、十分な周波数可変幅が得られる。

【0125】また、本発明では、可変容量素子と発振素子とを一体的に形成することが可能であり、半導体素子とのモノリシック化も可能なので、小型化に有利である。

【0126】さらに、可変容量素子において強誘電性薄膜および反強誘電性薄膜をエビタキシャル膜とすることにより、1.5～2GHz帯においても十分に大きなQが得られ、また、特性の安定性が良好となる。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】第1実施例のVCOを示す断面図である。

【図2】第1実施例における蓄積電荷量の履歴曲線を示すグラフである。

【図3】第1実施例における容量の印加電圧依存性を示すグラフである。

【図4】本発明のVCOの動作を説明するための回路図である。

【図5】第1実施例におけるインピーダンスの周波数応答を示すグラフである。

【図6】第1実施例におけるインピーダンスの印加電圧依存性を示すグラフである。

【図7】第2実施例のVCOを示す断面図である。

【図8】第2実施例におけるインピーダンスの印加電圧依存性を示すグラフである。

【図9】(A)～(D)は、第3実施例のVCOの製造

工程を説明するための断面図であり、(E)は、第3実施例のVCOを示す断面図である。

【図10】第3実施例における蓄積電荷量の履歴曲線を示すグラフである。

【図11】第4実施例のVCOを示す断面図である。

【図12】第4実施例におけるインピーダンスの印加電圧依存性を示すグラフである。

【図13】位相同期ループの概念図である。

【図14】可変容量素子の接続によるインピーダンス虚数部の周波数応答曲線の変化を示すグラフである。

#### 【符号の説明】

1 ダイヤフラム

2 Si基板

21 KNbO<sub>3</sub>単結晶基板

3 バッファ層

4 下地電極

5、51、52 強誘電性・圧電性薄膜

53 反強誘電性薄膜

54 誘電体薄膜

20 61、62 上部電極

63 楕形電極

10 ダイボンド剤

11 パッケージ

12 ワイヤ

13 蓋

100 位相差検出器

101 ループフィルタ

102 増幅器

103 VCO

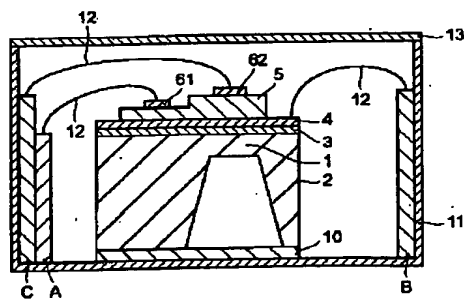
30 200 能動回路

201 発振素子

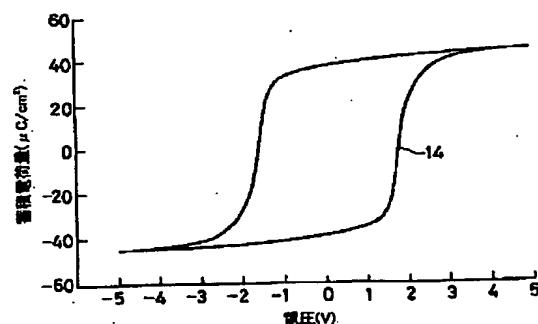
202 可変容量素子

A、B、C 外部接続端子

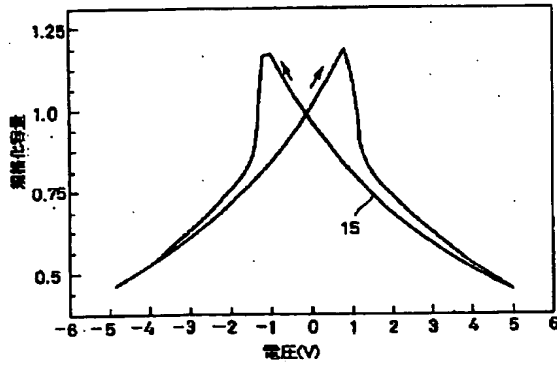
【図1】



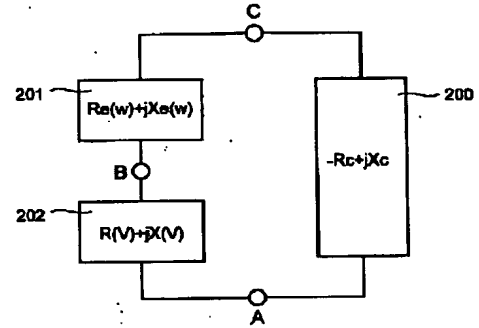
【図2】



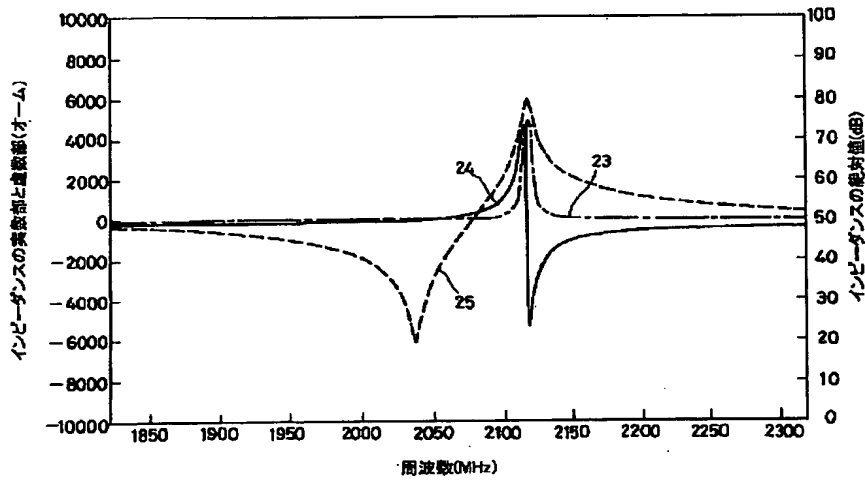
【図 3】



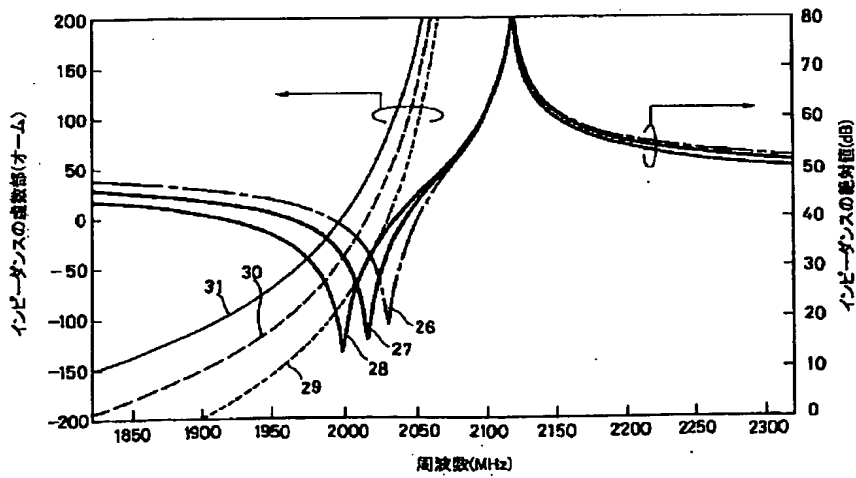
【図 4】



【図 5】

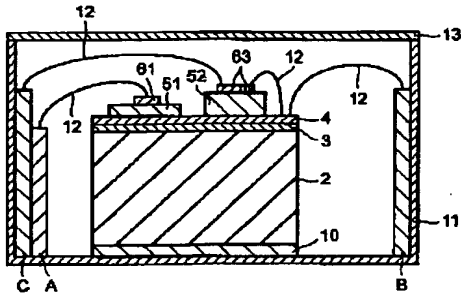


【図 6】

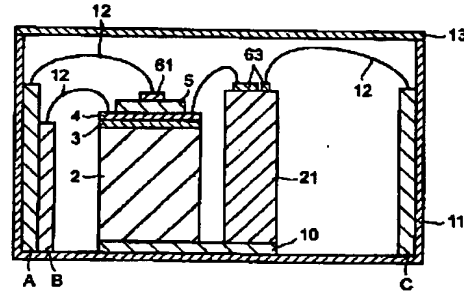




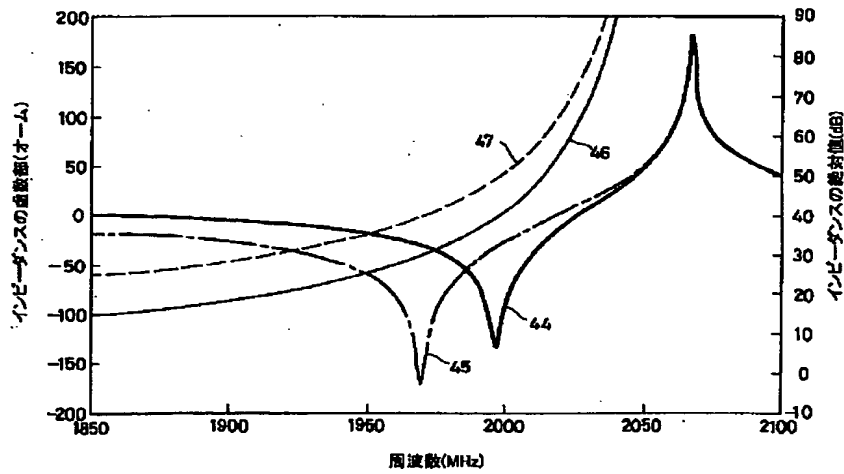
【図 7】



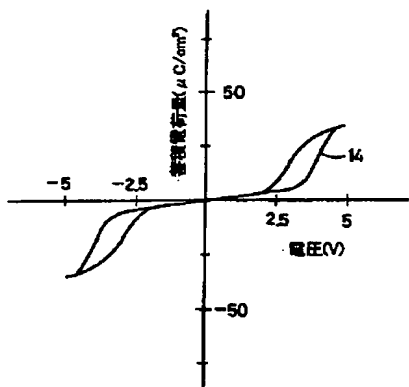
【図 11】



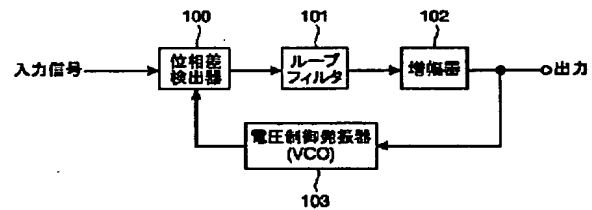
【図 8】



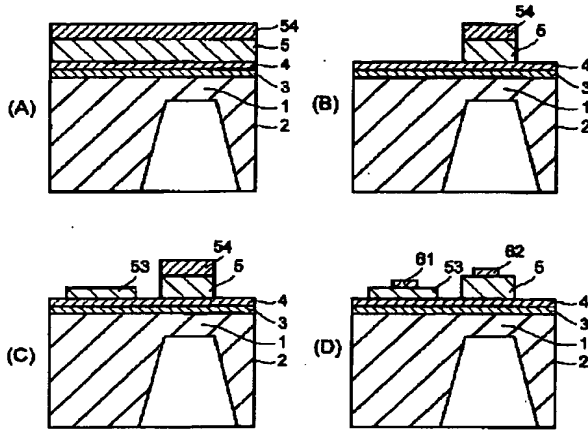
【図 10】



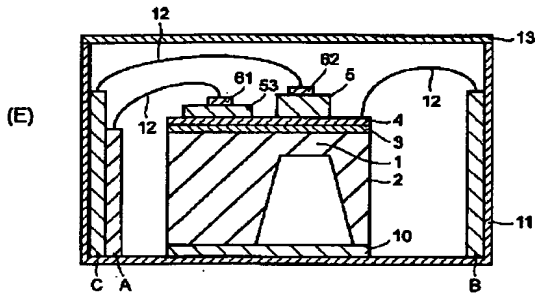
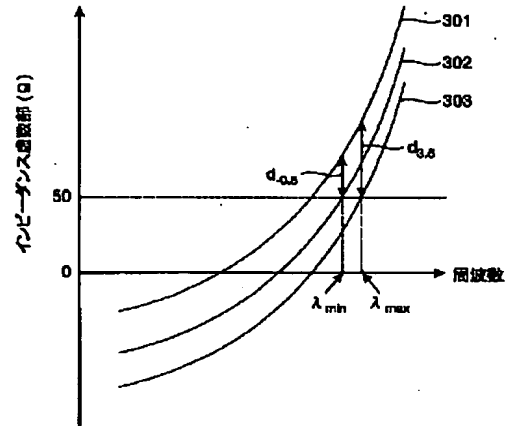
【図 13】



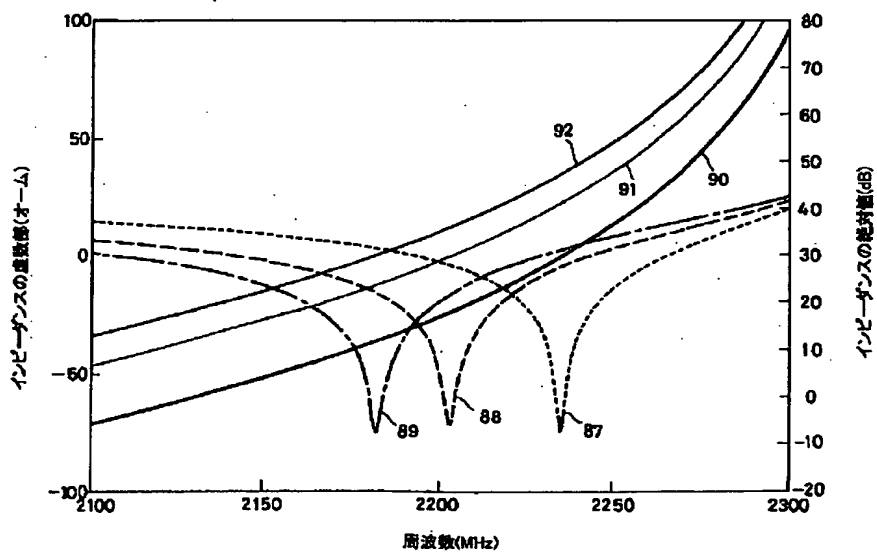
【図9】



【図 14】



【図 12】



## \* NOTICES \*

Japan Patent Office is not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. \*\*\*\* shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

---

**CLAIMS**


---

[Claim(s)]

[Claim 1] The voltage controlled oscillator with which an impedance characteristic is controlled by the control voltage which it has an oscillation element equipped with a piezo-electric bulk oscillating element or a surface-acoustic-wave resonator, and a variable-capacity element equipped with the ferroelectricity thin film or antiferroelectricity thin film inserted into the electrode of a couple, and the series connection of the aforementioned oscillation element and the aforementioned variable-capacity element is carried out, and is impressed to the ends of the aforementioned variable-capacity element.

[Claim 2] The voltage controlled oscillator of a claim 1 with which the piezo-electric bulk oscillating element which has the piezoelectric thin film inserted into the electrode of a couple, and the variable-capacity element which has the ferroelectricity thin film or antiferroelectricity thin film inserted into the electrode of a couple adjoin on a substrate, and is arranged.

[Claim 3] The voltage controlled oscillator of a claim 1 with which a surface-acoustic-wave resonator equipped with a piezoelectric thin film and a tandem-type electrode and a variable-capacity element equipped with the ferroelectricity thin film or antiferroelectricity thin film inserted into the electrode of a couple adjoin on a substrate, and are arranged.

[Claim 4] One voltage controlled oscillator of the claims 1-3 with which an impedance characteristic is controlled by impressing the control voltage of reversed polarity with the saturation voltage where it impressed the control voltage or the aforementioned saturation voltage is impressed, after impressing the voltage more than the saturation voltage in the hysteresis curve of the amount of stored charges of a ferroelectricity thin film or an antiferroelectricity thin film to the aforementioned variable-capacity element.

[Claim 5] One voltage controlled oscillator of the claims 1-4 the aforementioned ferroelectricity thin film and whose aforementioned antiferroelectricity thin films are epitaxial films.

[Claim 6] One voltage controlled oscillator of the claims 1-5 with which the aforementioned antiferroelectricity thin film includes [ the aforementioned ferroelectricity thin film ] PbZrO<sub>3</sub> crystal including Pb content perovskite crystal or BaTiO<sub>3</sub> crystal.

[Claim 7] One voltage controlled oscillator of the claims 1-6 used by the phase synchronous loop after the voltage more than the aforementioned saturation voltage is impressed to the aforementioned variable-capacity element in accordance with oscillation frequency when the input setting frequency when operating a phase synchronous loop impresses a saturation voltage to the aforementioned variable-capacity element, when used as a voltage controlled oscillator in a phase synchronous loop.

---

[Translation done.]

## \* NOTICES \*

Japan Patent Office is not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. \*\*\*\* shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

## DETAILED DESCRIPTION

[Detailed Description of the Invention]

[0001]

[The technical field to which invention belongs] this invention relates to the voltage controlled oscillator used for mobile communication equipment etc.

[0002]

[Description of the Prior Art] Since mobile communications which used the 1.9GHz band from the 800MHz band, such as a cellular phone and PHS, spread quickly and correspond to the increase of a subscriber recently, and in order to realize the telephone of a cosmopolitan, introduction of new specification, such as IMT2000 system, is considered. Introduction of the system to 2Mbps(es) is considered for the maximum bit rate as a phase 1 by this IMT2000 system. The wideband CDMA method which extended bandwidth to 5MHz / 10MHz / 20MHz, and the TDMA method which incorporated frequency hopping were examined by this system. Since the direct diffusion sign is used for the former, in the present condition, the limitation of use bandwidth is called 5 to 10MHz by interference of the multiplex propagation path of an electric wave, and its development of new interference cancellation technology is indispensable. The high-speed frequency synthesizer for frequency hopping is required, and the latter operates to this frequency synthesizer with the 2GHz band of center frequency, and needs for it the VCO (voltage controlled oscillator) circuit whose frequency adjustable width of face is 5MHz to 20MHz (from 0.25% of standardization frequency adjustable width of face to 1%).

[0003] The terminal of these systems is strongly required to be smaller than before, in order to raise convenience. The miniaturization of the parts to be used is indispensable to the miniaturization of a terminal. About the miniaturization of a VCO circuit used for a frequency synthesizer, although it is thought from the conventional discrete part that bare chip mounting and a further have effective monolithic-izing, it is necessary to conquer various technical problems, and utilization is not progressing easily.

[0004] By the way, the piezo-electric bulk oscillating element and surface-acoustic-wave resonator using single crystal piezoelectric material have the features, like resonance loss is small in small, no adjusting, and Quantity Q, and are used for the VCO circuit combining varactor diode.

[0005] However, the application to the communication system which uses a 2GHz band since the usable frequency range is hundreds of MHz or less for the VCO circuit using the piezo-electric bulk oscillating element using the single crystal of LiTaO<sub>3</sub> grade is impossible. On the other hand, the VCO circuit using the surface-acoustic-wave resonator is studied even to the 900MHz band. However, on the frequency of a 2GHz band, a resistance component increases, Q becomes low sharply, as for the varactor diode which is the key parts of a frequency adjustable element, C/N falls, and a practical property is not acquired.

[0006]

[Problem(s) to be Solved by the Invention] The purpose of this invention is enabling practical operation with the 2GHz band of center frequency, and realizing sufficient frequency adjustable width of face in

VCO (voltage controlled oscillator) which has a piezo-electric bulk oscillating element or a surface-acoustic-wave resonator as an oscillation element. Moreover, other purposes of this invention are realizing the miniaturization of such VCO.

[0007]

[Means for Solving the Problem] The above-mentioned purpose is attained by this invention of following the (1) - (7).

(1) The voltage controlled oscillator with which an impedance characteristic is controlled by the control voltage which it has an oscillation element equipped with a piezo-electric bulk oscillating element or a surface-acoustic-wave resonator, and a variable-capacity element equipped with the ferroelectricity thin film or antiferroelectricity thin film inserted into the electrode of a couple, and the series connection of the aforementioned oscillation element and the aforementioned variable-capacity element is carried out, and is impressed to the ends of the aforementioned variable-capacity element.

(2) The voltage controlled oscillator of the above (1) with which the piezo-electric bulk oscillating element which has the piezoelectric thin film inserted into the electrode of a couple, and the variable-capacity element which has the ferroelectricity thin film or antiferroelectricity thin film inserted into the electrode of a couple adjoin on a substrate, and is arranged.

(3) The voltage controlled oscillator of the above (1) with which a surface-acoustic-wave resonator equipped with a piezoelectric thin film and a tandem-type electrode and a variable-capacity element equipped with the ferroelectricity thin film or antiferroelectricity thin film inserted into the electrode of a couple adjoin on a substrate, and are arranged.

(4) the above -- variable capacity -- an element -- a ferroelectricity -- a thin film -- or -- antiferroelectricity -- a thin film -- a stored charge -- an amount -- a hysteresis curve -- it can set -- a saturation voltage -- more than -- voltage -- having impressed -- after -- a control voltage -- impressing -- or -- or -- the above -- a saturation voltage -- having impressed -- a state -- the -- a saturation voltage -- reversed polarity -- a control voltage -- impressing -- things -- an impedance characteristic -- controlling -- having -- the above -- (-- one --)

(5) One voltage controlled oscillator of above-mentioned (1) - (4) the aforementioned ferroelectricity thin film and whose aforementioned antiferroelectricity thin films are epitaxial films.

(6) One voltage controlled oscillator of above-mentioned (1) - (5) with which the aforementioned antiferroelectricity thin film includes [ the aforementioned ferroelectricity thin film ] PbZrO<sub>3</sub> crystal including Pb content perovskite crystal or BaTiO<sub>3</sub> crystal.

(7) a phase synchronous loop -- it can set -- a voltage controlled oscillator -- \*\*\*\*\* -- using -- having -- the time -- a phase synchronous loop -- operating -- making -- the time -- an input -- a setup -- frequency -- the above -- variable capacity -- an element -- a saturation voltage -- having impressed -- the time -- an oscillation -- frequency -- being in agreement -- or -- or -- the above -- variable capacity -- an element -- the above -- a saturation voltage -- more than -- voltage -- impressing -- having had -- after -- a phase synchronous loop -- using it

[0008]

[Embodiments of the Invention] The example of VCO which used the piezo-electric bulk oscillating element for 1st example drawing 1 as an oscillation element is shown.

[0009] This VCO has Si (100) single crystal substrate (only henceforth Si substrate) 2 in which the diaphragm 1 was formed, and has the up electrodes 61 and 62 which consist of the buffer layer 3 which consists of a silicon-oxide layer / a zirconium-oxide layer / a barium-titanate layer on the Si substrate 2, the ground electrode 4 which consists of platinum, the ferroelectricity which consists of PZT and a piezoelectric thin film 5, and Au in this order.

[0010] A diaphragm 1 forms the Si substrate 2 by \*\*\*\*\*ing from the inferior-surface-of-tongue side in drawing, and thickness is 20 micrometers.

[0011] The ferroelectricity and the piezoelectric thin film 5 have \*\*\*\*\*ed partially with photo lithography technology. The field which \*\*\*\*\*ed is a part of field except a diaphragm 1 top. The thickness of a ferroelectricity and the piezoelectric thin film 5 is 0.7 micrometers, and is 0.6 micrometers in an etching field. The up electrode 61 exists on an etching field, and the up electrode 62 exists on a

diaphragm 1. Although the ferroelectricity and the piezoelectric thin film 5 were formed by plural vacuum depositions, it can also be formed by the MBE method, the RF magnetron-sputtering method, etc. This ferroelectricity and piezoelectric thin film 5 checked by RHEED that it was the epitaxial film mentioned later. In analysis by the X diffraction, this thin film was an orientation (001) film with which 90-degree domain was formed, and peak intensity ratios were  $(100) / (001) = 0.98$ . Moreover, the atomic ratio in a film was  $\text{Zr}:\text{Ti}=23.8:76.2$  as a result of the component analysis by fluorescence X rays.

[0012] In this VCO, the field where it \*\*\*\*\*ed in the ferroelectricity and the piezoelectric thin film 5, and the ground electrode 4 and the up electrode 61 which sandwiches this constitute a variable-capacity element. Moreover, the ferroelectricity and the piezoelectric thin film 5 on a diaphragm 1, and the ground electrode 4 and the up electrode 62 which sandwiches this constitute a piezo-electric bulk oscillating element. In both elements, the thickness of a ferroelectricity and the piezoelectric thin film 5 differs, because it optimized for each element. In addition, the size of the up electrode 61 is 14-micrometer angle, and the size of the up electrode 62 is 15-micrometer angle. Moreover, the up electrode 61 is provided in the position which separated about 200 micrometers from the edge of the up electrode 62 so that there may be no influence of the impedance characteristic on a piezo-electric bulk oscillating element.

[0013] When the dielectric constant of a variable-capacity element was measured by the wafer prober, it was about  $240\epsilon_0$ . Here,  $\epsilon_0$  is the dielectric constant of vacuum.

[0014] In addition, in the Si substrate 2 row shown in drawing 1, the thin film and electrode on it were produced by dividing into a chip using dicing equipment, after having \*\*\*\*\*ed Si wafer, forming the diaphragm and forming an electrode and a thin film on Si wafer.

[0015] The inferior surface of tongue of the Si substrate 2 is pasted up on the base of a package 11 by the die bond agent 10, and the upper part of a package 11 is closed with the lid 13. In the package 11, the external end-connection children A, B, and C connecting with the exterior existed, and these connected with the up electrode 61, the ground electrode 4, and the up electrode 62 electrically through the wire 12, respectively, and have connected the variable-capacity element and the piezo-electric bulk oscillating element in series. The electrical-equivalent circuit for explaining operation of this VCO to drawing 4 is shown. In drawing 4, the variable-capacity element 202 and the oscillation element (piezo-electric bulk oscillating element) 201 are connected in series. A, B, and C which are shown in drawing 4 correspond to the external end-connection children A, B, and C who show drawing 1.

[0016] In this VCO, when the external terminal of a package 11 was used and about [ peak swing 5V ] low frequency voltage was impressed between the up electrode 61 of a variable-capacity element, and the ground electrode 4 based on the Sawyer-Tower method, the hysteresis curve 14 of the amount of stored charges shown in drawing 2 was obtained. Drawing 2 shows that the saturation voltage in this case is about 4V. Moreover, the applied-voltage dependency curve 15 of the capacity shown in drawing 3 was obtained from the inclination of this hysteresis curve 14. The vertical axis of drawing 3 is standardized by capacity in case applied voltage is zero. After this variable-capacity element impressed low frequency voltage and direct current voltage, its aging of a hysteresis curve or capacity was small, and it made it clear that it is fully equal to practical use as a variable-capacity element.

[0017] Operation of this VCO is explained using drawing 4. An active circuit 200 is negative resistance. - Having  $R_c$  and capacitive reactance  $X_c$ , the oscillation element 201 has impedance  $R_e(w) + jX_e(w)$ , and the variable-capacity element 202 has carried out impedance  $R(V) + jX(V)$  more.  $V$  expresses the voltage impressed to the variable-capacity element 202 here. It is known that the oscillation conditions of this VCO circuit are  $R(V) + R_e(w) < |R_c|$  and  $X_e(w) + X(V) = X_c$ , and it is also known for the RF band that  $X_c$  of an usable active circuit generally has the value of about 30-100ohms.

[0018] The resonance characteristic of the impedance between AC when impressing 4V which are the saturation voltage of the variable-capacity element in the 1st example between AB(s) of drawing 4 is shown in drawing 5. Curves 23, 24, and 25 show the real part of an impedance, imaginary part, and an absolute value among drawing, respectively. Since a ferroelectricity and the piezoelectric thin film 5 are epitaxial films, loss of a variable-capacity element becomes very small, consequently the real part of an impedance [ near the resonance frequency ] becomes several ohms or less, and  $R(V) + R_e(w) < |R_c|$  which

is a part of oscillation conditions is fully filled with this example.

[0019] The absolute value of the impedance between AC when changing the applied voltage between AB(s) of drawing 4 (control voltage) to drawing 6 and change of imaginary part are shown. In this drawing, curves 26, 27, and 28 express the absolute value of an impedance in case control voltages are 3.5V, 1.3V, and -0.5V, respectively, and curves 29, 30, and 31 express the imaginary part of an impedance in case control voltages are 3.5V, 1.3V, and -0.5V, respectively. In addition, this measurement was performed after impressing between AB(s) 4V which are a saturation voltage. When setting the reactance  $X_c$  of an active circuit as 50 ohms which is a general value, changing the control voltage between AB(s) from 3.5V to -0.5V and the frequency which fulfills oscillation conditions is estimated from drawing 6, it turns out that it changes from 2.042GHz to 2.020GHz. If this is changed to standardization frequency adjustable width of face, it will become about 1%.

[0020] Moreover, after impressing -4V which are another saturation voltage of a variable-capacity element, when it sets up the reactance  $X_c$  of an active circuit with 50 ohms and the control voltage was changed with -3.5V, -1.3V, and +0.5V between AB(s) of drawing 4, the frequency which fulfills oscillation conditions changed from 2.042GHz to 2.020GHz. Also in this case, standardization frequency adjustable width of face becomes about 1%.

[0021] The conceptual diagram of a phase synchronous loop is shown in drawing 13. This phase synchronous loop consists of the phase contrast detector (phase phase comparator) 100, a loop filter 101, amplifier 102, and VCO103. If this phase synchronous loop is operated, first, the input voltage of VCO103 will oscillate by the free running frequency set as zero, and will be drawn in the setting frequency of an input signal after that. After using as VCO103 which shows VCO of this example to drawing 13 and impressing direct-current-voltage 5V between AB(s) of drawing 4, when the phase synchronous loop was operated, the input voltage to VCO fed back from amplifier 102 began to oscillate by zero, the output frequency of VCO was set to 2.042GHz, and it was automatically drawn in the input frequency set as low frequency from this frequency.

[0022] Although direct current voltage was impressed between AB(s) of drawing 4 here, you may impress the low frequency voltage the spontaneous polarization of a ferroelectricity thin film does not follow in whose footsteps. Moreover, the voltage impressed between AB(s) before impressing a control voltage should just be the voltage more than the saturation voltage in the hysteresis curve of the amount of stored charges. If the voltage more than a saturation voltage is impressed, since the fixed hysteresis curve as shown in drawing 2 can be used, the stable oscillation frequency corresponding to a control voltage is obtained. Moreover, with [ an absolute value ] a saturation voltage [ more than ], the voltage impressed between AB(s) may be a minus side, for example, is good also considering applied voltage as -5V. In addition, a control voltage carries out to below a saturation voltage.

[0023] Moreover, it is good also as composition which impresses a control voltage, impressing the aforementioned saturation voltage between AB(s). In this case, a control voltage is impressed between AB(s) using another circuit, impressing a saturation voltage between AB(s). In this case, a control voltage considers as reversed polarity to a saturation voltage, and it is made for the voltage between AB(s) not to exceed a saturation voltage. Also in this composition, the stable oscillation frequency corresponding to a control voltage is obtained.

[0024] In a phase synchronous loop, probably, since the input voltage to VCO oscillates by the free running frequency of zero, when the conventional VCO is only transposed to VCO of this invention, voltage may not be impressed to a variable-capacity element and the stable oscillation frequency corresponding to a control voltage may not be obtained. However, exact operation is attained by impressing a control voltage, impressing a control voltage or impressing voltage, once impressing voltage between AB(s), as described above.

[0025] Moreover, when applying VCO of this invention to a phase synchronous loop, it is good also as composition which makes the input setting frequency when operating a phase synchronous loop in agreement with the oscillation frequency when impressing the above-mentioned saturation voltage to a variable-capacity element. In this case, since the voltage equivalent to the above-mentioned saturation voltage is automatically impressed to a variable-capacity element, exact operation is attained. And what

is necessary is just to set input setting frequency as a desired value after that.

[0026] As described above, in this invention, a variable-capacity element is connected to an oscillation element, by impressing a control voltage between AB(s) of drawing 4, the impedance between AC is changed and change of oscillation frequency is enabled. It is required for VCO of this invention that about 1% or more of standardization frequency adjustable width of face should be realizable in the RF region around 2GHz, using the about [ 5V less than ] low battery used with the cellular phone etc. as a control voltage. Then, in order to satisfy such a demand, the property needed for a variable-capacity element is considered.

[0027] As mentioned above, the impedance change between AC when changing the control voltage between AB(s) of drawing 4 is shown in drawing 6. In drawing 6, curves 29, 30, and 31 express the frequency response of impedance imaginary part in case control voltages are 3.5V, 1.3V, and -0.5V, respectively. As shown in drawing 6, when the same frequency compares, impedance imaginary part falls as a control voltage increases. If based on the frequency response curve in the state where a variable-capacity element is not connected, a frequency response curve will move to the perpendicular direction in drawing mostly with increase of a control voltage at parallel. And the degree of a fall of the impedance imaginary part by this parallel displacement is dependent on the property of the ferroelectricity thin film of a variable-capacity element, or an antiferroelectricity thin film. Specifically, it will become peculiar to the voltage-standardization capacity curve shown in drawing 3. This voltage-standardization capacity curve is dependent on composition of a thin film, crystallinity, thickness, etc.

[0028] The frequency response curve of impedance imaginary part is typically shown in drawing 14. A curve 301 is the case where a variable-capacity element is not connected, and calls this a criteria curve on these specifications. A curve 302 is the case of control-voltage-0.5V and the amount of parallel displacements from a criteria curve (the amount of falls) is d-0.5ohms. A curve 303 is the case of control-voltage 3.5V, and the amount of parallel displacements from a criteria curve (the amount of falls) is d3.5ohm. Control voltage in a variable-capacity element - The standardization frequency adjustable width of face by making it change between 0.5-3.5V is expressed with  $(\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) / \lambda_{\max}$ . Since oscillation frequency is the frequency corresponding to an impedance value equal to the reactance  $X_c$  of an active circuit, the frequency from which impedance imaginary part is set to 50 ohms (general value of  $X_c$  of an active circuit) is used for it here. Therefore,  $\lambda_{\min}$  is the frequency corresponding to 50 ohms in a curve 302, and  $\lambda_{\max}$  is the frequency corresponding to 50 ohms in a curve 303. In an about 2GHz RF region, to  $\lambda_{\max} - \lambda_{\min}$ , since  $\lambda_{\max}$  is remarkable and large, standardization frequency adjustable width of face will be substantially determined in the size of  $\lambda_{\max} - \lambda_{\min}$ .

[0029] In drawing 14, the value which standardized d3.5-d-0.5 by d-0.5,  $d3.5-d-0.5 / d-0.5$  [ i.e.,  $(d3.5-d-0.5) / d-0.5$  ], is called standardization change width of face of impedance imaginary part on these specifications.  $(d3.5-d-0.5) / d-0.5$  is values closely correlated with  $\lambda_{\max} - \lambda_{\min}$ . Although d3.5 and d-0.5 change depending on the electrode area of a variable-capacity element when a variable-capacity element equipped with a specific ferroelectricity thin film or a specific antiferroelectricity thin film is connected,  $(d3.5-d-0.5) / d-0.5$  is not based on electrode area, but becomes fixed. d3.5 and d-0.5 become large, so that the electrode area of a variable-capacity element is small, when  $(d3.5-d-0.5) / d-0.5$  is fixed.

Although  $\lambda_{\max} - \lambda_{\min}$  will become large and standardization frequency adjustable width of face will become large while  $\lambda_{\max}$  and  $\lambda_{\min}$  move to a RF side if an impedance response curve is a straight line, and d3.5 and d-0.5 increase under the conditions that  $(d3.5-d-0.5) / d-0.5$  is certain, as for an impedance response curve, an inclination increases like a RF side in fact. For this reason, when the electrode area of a variable-capacity element becomes to some extent small,  $\lambda_{\max} - \lambda_{\min}$  will go to reduction. On the other hand, d3.5 and d-0.5 become small, so that electrode area becomes large. If d3.5 and d-0.5 decrease under the conditions that  $(d3.5-d-0.5) / d-0.5$  is certain, while  $\lambda_{\max}$  and  $\lambda_{\min}$  will move to a low frequency side,  $\lambda_{\max} - \lambda_{\min}$  becomes small and standardization frequency adjustable width of face becomes small.

[0030] Therefore, the greatest standardization frequency adjustable width of face will be obtained by choosing the electrode area of a variable-capacity element suitably. For example, when the electrode of



14-micrometer angle is prepared, it becomes  $d_{3.5}=199\text{ohm}$ ,  $d_{-0.5}=109\text{ohm}$ ,  $(d_{3.5}-d_{-0.5}) / d_{-0.5}=0.82$ ,  $\lambda_{\text{dmax}}=2.042\text{GHz}$ ,  $\lambda_{\text{dmin}}=2.020\text{GHz}$ , and standardization frequency adjustable width-of-face  $=1.09\%$ . On the other hand, when the electrode of 10-micrometer angle is prepared, it becomes  $d_{3.5}=392\text{ohm}$ ,  $d_{-0.5}=215\text{ohm}$ ,  $(d_{3.5}-d_{-0.5}) / d_{-0.5}=0.82$ ,  $\lambda_{\text{dmax}}=2.063\text{GHz}$ ,  $\lambda_{\text{dmin}}=2.045\text{GHz}$ , and standardization frequency adjustable width-of-face  $=0.88\%$ . Moreover, when the electrode of 30-micrometer angle is prepared, it becomes  $d_{3.5}=43.7\text{ohm}$ ,  $d_{-0.5}=23.9\text{ohm}$ ,  $(d_{3.5}-d_{-0.5}) / d_{-0.5}=0.82$ ,  $\lambda_{\text{dmax}}=1.989\text{GHz}$ ,  $\lambda_{\text{dmin}}=1.978\text{GHz}$ , and standardization frequency adjustable width-of-face  $=0.56\%$ . That is, in the three above-mentioned examples, except when the electrode of 14-micrometer angle is prepared, 1% or more of standardization frequency adjustable width of face cannot be obtained.

[0031]  $(d_{3.5}-d_{-0.5}) / d_{-0.5}$  [ in addition, ] Since the electrode area from which it is determined by the property of the ferroelectricity thin film of a variable-capacity element or an antiferroelectricity thin film, and the greatest standardization frequency adjustable width of face is obtained changes corresponding to the value of  $(d_{3.5}-d_{-0.5}) / d_{-0.5}$ , Control voltage - What is necessary is just to ask for the electrode area which gives the greatest standardization frequency adjustable width of face at the time of 0.5-3.5V according to the property of the ferroelectricity thin film of a variable-capacity element, or an antiferroelectricity thin film. However, if  $(d_{3.5}-d_{-0.5}) / d_{-0.5}$  is too small, although a suitable electrode area is chosen, it will become difficult to enlarge  $\lambda_{\text{dmax}}-\lambda_{\text{dmin}}$ . It sets for the oscillation element which specifically has an impedance characteristic equivalent to the oscillation element (a surface-acoustic-wave resonator or piezo-electric bulk oscillating element) using the PZT epitaxial film or  $\text{KNbO}_3$  single crystal as a piezoelectric material, and is a control voltage. - When referred to as 0.5-3.5V, in order to make standardization frequency adjustable width of face into 1% or more, it is desirable that  $(d_{3.5}-d_{-0.5}) / d_{-0.5}$  is 0.76 or more. When  $(d_{3.5}-d_{-0.5}) / d_{-0.5}$  is too large, the frequency domain to which the inclination of a frequency response curve becomes large will be used, and the real part of an impedance increases and it becomes impossible on the other hand, to fill oscillation condition  $R(V)+\text{Re}(w) < |R_c|$  with this frequency domain. Therefore, in the frequency domain with which the value of  $(d_{3.5}-d_{-0.5}) / d_{-0.5}$  is satisfied of the above-mentioned oscillation conditions, desired standardization frequency adjustable width of face should just be obtained. For example, when the oscillation element illustrated here is used, in order to make standardization frequency adjustable width of face into 1% or more, it is desirable that  $(d_{3.5}-d_{-0.5}) / d_{-0.5}$  is 1.35 or less.

[0032] Furthermore, the above-mentioned principle of operation shows that standardization frequency adjustable width of face can be enlarged, so that the inclination of the frequency response curve of impedance imaginary part is small. The inclination of a frequency response curve is in inverse proportion to the electromechanical coupling coefficient  $k^2$  of the piezoelectric material of an oscillation element. In a thin film, a PZT epitaxial film is the maximum, and  $\text{KNbO}_3$  of  $k^2$  of piezoelectric material is the maximum in a single crystal. Therefore, standardization frequency adjustable width of face can be enlarged by using such piezoelectric material.

[0033] The example of VCO which used the surface-acoustic-wave resonator for 2nd example drawing 7 as an oscillation element is shown.

[0034] This VCO has the Si substrate 2 and has the ferroelectricity and the piezoelectric thin films 51 and 52 which consist of the buffer layer 3 which consists of a silicon-oxide layer / a zirconium-oxide layer / a barium-titanate layer on the Si substrate 2, a ground electrode 4 which consists of platinum, and PZT. A ferroelectricity differs in thickness from the piezoelectric thin films 51 and 52. On a ferroelectricity and the piezoelectric thin film 51, the up electrode 61 which consists of Au is formed, and the Kushigata electrode 63 which consists of aluminum, respectively, and the strip reflector (not shown) are prepared on the ferroelectricity and the piezoelectric thin film 52.

[0035] A ferroelectricity and the piezoelectric thin films 51 and 52 formed the ferroelectricity and the piezoelectric thin film formed like the 1st example by \*\*\*\*\*ing with photo lithography technology. The thickness of a ferroelectricity and the piezoelectric thin film 51 is 0.6 micrometers, and the thickness of a ferroelectricity and the piezoelectric thin film 52 is 0.7 micrometers.

[0036] In this VCO, a ferroelectricity and the piezoelectric thin film 51, and the ground electrode 4 and

the up electrode 61 that sandwiches this constitute a variable-capacity element. Moreover, a ferroelectricity and the piezoelectric thin film 52, and the ground electrode 4 which sandwiches this and the Kushigata electrode 63 and a strip reflector constitute a surface-acoustic-wave resonator. In both elements, the thickness of a ferroelectricity and a piezoelectric thin film differs, because it optimized for each element. Moreover, it is for suppressing the influence on each other to have made the ferroelectricity and the piezoelectric thin film become independent in both elements. The size of the up electrode 61 is 35-micrometer angle, and line breadth is 0.4 micrometers in the Kushigata electrode 63 with 15 micrometers of opening length, and a strip reflector. The logarithm of the Kushigata electrode 63 set the number of 30 and a strip reflector to 100. Distance of the Kushigata electrode 63 and a strip reflector was set to 0.8 micrometers by the pitch. The Kushigata electrode 63 and the strip reflector have been arranged so that a pitch with the up electrode 61 may be set to 200 micrometers, and they were considered so that there might be no influence of the impedance characteristic on the surface-acoustic-wave resonator by the up electrode 61 so that the propagation direction of a surface acoustic wave might pierce through drawing 7 perpendicularly.

[0037] In addition, in the Si substrate 2 row shown in drawing 7, the thin film and electrode on it were produced by dividing into a chip using dicing equipment, after forming an electrode and a thin film on Si wafer.

[0038] The undersurface of the Si substrate 2 is pasted up on the base of a package 11 by the die bond agent 10, and the upper part of a package 11 is closed with the lid 13. In the package 11, the external end-connection children A, B, and C connecting with the exterior existed, and these have connected with the output-electrode pad of the up electrode 61, the ground electrode 4, and the Kushigata electrode 63 electrically through a wire 12, respectively. Moreover, the input-electrode pad of the Kushigata electrode 63 is connected to the ground electrode 4 through a wire 12. Also in this VCO, the surface-acoustic-wave resonator which are a variable-capacity element and an oscillation element is connected in series.

[0039] It was 4V, when the hysteresis curve of the amount of stored charges was obtained like the 1st example and it asked for the saturation voltage about the variable-capacity element of this VCO after this. Also in this variable-capacity element, the applied-voltage dependency of capacity as shown in drawing 3 exists.

[0040] Therefore, operation of VCO which carried out the series connection of a variable-capacity element and the surface-acoustic-wave resonator becomes the same as operation of the 1st example which explained using drawing 4. Then, after impressing 4V which are the saturation voltage to a variable-capacity element, applied voltage (control voltage) was set as 3.5V or -0.5V, and the absolute value and imaginary part of an impedance between AC of VCO were measured. A result is shown in drawing 8. In drawing 8, curves 44 and 45 express the absolute value of an impedance in case applied voltage is 3.5V and -0.5V, respectively, and curves 46 and 47 express the imaginary part of an impedance in case applied voltage is 3.5V and -0.5V, respectively.

[0041] When setting the reactance  $X_c$  of the active circuit in drawing 4 as 50 ohms which is a general value, changing applied voltage from 3.5V to -0.5V here and the frequency which fulfills oscillation conditions is estimated from drawing 8, about 1% and a bird clapper understand standardization frequency adjustable width of face.

[0042] The example of VCO which used the piezo-electric bulk oscillating element for 3rd example drawing 9 (E) as an oscillation element is shown.

[0043] This VCO has the Si substrate 2 in which the diaphragm 1 was formed, has the buffer layer 3 which consists of a silicon-oxide layer / a zirconium-oxide layer / a barium-titanate layer on the Si substrate 2, and the ground electrode 4 which consists of platinum in this order, and has the antiferroelectricity thin film 53 which consists of  $PbZrO_3$  on the ground electrode 4 and the up electrode 61 on it, and the ferroelectricity and the piezoelectric thin film 5 which consists of PZT, and the up electrode 62 on it, respectively. A diaphragm 1, and a ferroelectricity and a piezoelectric thin film 5 are formed like the 1st example.

[0044] A ferroelectricity, the piezoelectric thin film 5, and the up electrode 62 exist on a diaphragm 1,

and constitute a piezo-electric bulk oscillating element in accordance with the ground electrode 4. On the other hand, the antiferroelectricity thin film 53 and the up electrode 61 are formed in a part of field except a diaphragm 1 top, and constitute a variable-capacity element in accordance with the ground electrode 4. The up electrode 61 is 30-micrometer angle, and the up electrode 62 is 15-micrometer angle. The up electrode 61 is provided in the position which separated 200 micrometers from the edge of the up electrode 62 so that there may be no influence of the impedance characteristic on a piezo-electric bulk oscillating element.

[0045] Here, drawing 9 (A) - drawing 9 (D) explain the manufacture process of both elements. First, a buffer layer 3, the ground electrode 4, and a ferroelectricity and a piezoelectric thin film 5 are formed like the 1st example on the Si substrate 2 in which the diaphragm 1 was formed. Subsequently, the dielectric thin film 54 which can be etched is formed on a ferroelectricity and the piezoelectric thin film 5 [ drawing 9 (A) ]. Then, except for the field used as a piezo-electric bulk oscillating element, photo lithography technology removes the dielectric thin film 54, and a ferroelectricity and a piezoelectric thin film 5 [ drawing 9 (B) ]. Subsequently, the antiferroelectricity thin film 53 with a thickness of about 0.6 micrometers is formed on the ground electrode 4 which appeared by removal [ drawing 9 (C) ]. Next, after etching removes the dielectric thin film 54 which remains on the ferroelectricity and the piezoelectric thin film 5, the up electrode 61 is formed on the antiferroelectricity thin film 53, and the up electrode 62 is formed on a ferroelectricity and the piezoelectric thin film 5, respectively [ drawing 9 (D) ].

[0046] In drawing 9 (E), the inferior surface of tongue of the Si substrate 2 is pasted up on the base of a package 11 by the die bond agent 10, and the upper part of a package 11 is closed with the lid 13. In the package 11, the external end-connection children A, B, and C connecting with the exterior existed, and these have connected with the up electrode 61, the ground electrode 4, and the up electrode 62 electrically through a wire 12, respectively. Also in this VCO, the variable-capacity element and the piezo-electric bulk oscillating element which is an oscillation element are connected in series.

[0047] In this VCO, when the external terminal of a package 11 was used and about [ peak swing 5V ] low frequency voltage was impressed between the up electrode 61 of a variable-capacity element, and the ground electrode 4 based on the Sawyer-Tower method, the hysteresis curve 14 of the amount of stored charges shown in drawing 10 was obtained. This hysteresis curve is a double hysteresis curve. Moreover, the applied-voltage dependency curve of capacity was obtained from the inclination of this hysteresis curve 14. After this variable-capacity element impressed low frequency voltage and direct current voltage, its aging of a hysteresis curve or capacity was small, and that it is fully equal to practical use made it clear.

[0048] Operation of this VCO becomes the same as operation of the 1st example explained using drawing 4 . The piezo-electric bulk oscillating element of this VCO is the same as that of the 1st example. In this VCO, after impressing 5V which are the saturation voltage to a variable-capacity element, when it changed applied voltage (control voltage) from 5V to 2.5V and the absolute value and imaginary part of an impedance between AC of VCO were measured, the same result as drawing 8 was obtained. The reactance  $X_c$  of an active circuit shown in drawing 4 is set as 50 ohms which is a general value, and when the frequency which fulfills oscillation conditions is estimated from drawing 8 , about 1% and a bird clapper understand standardization frequency adjustable width of face.

[0049] In addition, even when BaTiO<sub>3</sub> thin film which is a ferroelectric with a double hysteresis curve as a ferroelectricity and a piezoelectric thin film 5 is used, the function same as a variable-capacity element is obtained.

[0050] In the above 1st, the 2nd, and 3rd examples, although one Si substrate is used with both the variable-capacity element and the oscillation element in consideration of a miniaturization and simplification of a manufacturing process, you may form each element on separate Si substrate. Moreover, a ground electrode is common to both elements, and it is good also as composition which prepares a ground electrode independently for every element, and carries out the series connection of both the elements with a wire etc. Moreover, in each above-mentioned example, although the ferroelectricity and the piezoelectric thin film were constituted from PZT, Pb content perovskite

ferroelectricity thin film which is indicated by JP,9-321362,A and which carried out c axis orientation can also be used.

[0051] In the 1st example and the 3rd example, although thickness of a diaphragm was set to 20 micrometers, as long as it is the range which can hold a mechanical strength, you may make it still thinner. Moreover, after forming a piezoelectric thin film on a diaphragm, a diaphragm is \*\*\*\*\*ed from a rear-face side and Si may be removed completely.

[0052] The example of VCO which used the surface-acoustic-wave resonator for 4th example drawing 11 as an oscillation element is shown.

[0053] This VCO has a variable-capacity element and a surface-acoustic-wave resonator, and these are arranged together with the inside of a package 11.

[0054] A variable-capacity element has the Si substrate 2, and has the up electrode 61 which consists of the buffer layer 3 which consists of a silicon-oxide layer / a zirconium-oxide layer / a barium-titanate layer on this, the ground electrode 4 which consists of platinum, the ferroelectricity which consists of PZT and a piezoelectric thin film 5, and Au in this order. The size of the up electrode 61 is 35-micrometer angle. The diaphragm 1, and a ferroelectricity and a piezoelectric thin film 5 were formed like the 1st example.

[0055] A surface-acoustic-wave resonator has the KNbO<sub>3</sub> single-crystal substrate 21, and has the Kushigata electrode 63 and a strip reflector (not shown) on this. The logarithm of the Kushigata electrode 63, the number of a strip reflector, and both pitch are the same as the 2nd example.

[0056] The Si substrate 2 and the KNbO<sub>3</sub> single-crystal substrate 21 are pasted up on package 11 base by the die bond agent 10, and the upper part of a package 11 is closed with the lid 13. In the package 11, the external end-connection children A, B, and C connecting with the exterior existed, and these have connected with the output-electrode pad of the up electrode 61, the ground electrode 4, and the Kushigata electrode 63 electrically through a wire 12, respectively. Moreover, the input-electrode pad of the Kushigata electrode 63 is connected to the ground electrode 4 through a wire 12. Also in this VCO, the surface-acoustic-wave resonator which are a variable-capacity element and an oscillation element is connected in series.

[0057] In this VCO, the variable-capacity element is the same as the variable-capacity element in the 2nd example. Therefore, the hysteresis curve of the amount of stored charges and the applied-voltage dependency of capacity are also the same. Moreover, operation of VCO which connected the variable-capacity element and the surface-acoustic-wave resonator in series becomes the same as operation of the 1st example explained using drawing 4.

[0058] Then, after impressing 4V which are the saturation voltage to a variable-capacity element, applied voltage (control voltage) was set as 3.5V, 1.3V, and -0.5V, and the absolute value and imaginary part of an impedance between AC of VCO were measured. A result is shown in drawing 12. In drawing 12, curves 87, 88, and 89 express the absolute value of an impedance in case applied voltage is 3.5V, 1.3V, and -0.5V, respectively, and curves 90, 91, and 92 express the imaginary part of an impedance in case applied voltage is 3.5V, 1.3V, and -0.5V, respectively.

[0059] When setting the reactance Xc of the active circuit in drawing 4 as 50 ohms which is a general value, changing applied voltage from 3.5V to -0.5V here and the frequency which fulfills oscillation conditions is estimated from drawing 12, about 1.2% and a bird clapper understand standardization frequency adjustable width of face.

[0060] The composition of each part of a variable-capacity element, next the composition of each part of the variable-capacity element in VCO of this invention are explained more to a detail.

[0061] Although especially the material of the substrate used by the substrate this invention is not limited, a single crystal is used preferably. Specifically, although any, such as semiconductors, such as insulators, such as a magnesia, a strontium titanate, sapphire, a zirconia, a stabilized zirconia, a lithium niobate, and a lithium tantalate, and gallium arsenide, silicon, may be used, Si single crystal is used preferably. When it uses so that the field (100) of Si single crystal may turn into a substrate front face especially, the functional epitaxial film which was excellent in the property can be formed. Moreover, since it is used widely by the semiconductor device, Si is suitable when composite-izing VCO of this

invention with other semiconductor devices. Moreover, since the coefficient of thermal expansion of a substrate is in agreement even when using it combining other semiconductor devices, it is desirable. For example, since 1 figure of coefficients of thermal expansion of a MgO substrate differs from Si, they are unsuitable for such a use. Moreover, Si is comparatively cheap.

[0062] In VCO of a ferroelectricity thin film and an antiferroelectricity thin film this invention, in the voltage of about several volts used with cellular phones, such as IMT2000 system, etc., in order to operate a variable-capacity element using the dielectric constant change by spontaneous-polarization change, a thin film is used as a ferroelectric and an antiferroelectric crystal. For example, since it is thin to 200 micrometers or more from the limit of processing technology when using a bulk single crystal, on the voltage of about several volts, the dielectric constant change by spontaneous-polarization change cannot be used. Although what is necessary is just to set up suitably the thickness of the ferroelectricity thin film used for a variable-capacity element in this invention, and an antiferroelectricity thin film so that the dielectric constant change by spontaneous-polarization change can be used, namely, so that for example, the aforementioned saturation voltage may become about 1-9V when the voltage of about several volts is impressed, it is usually desirable to be referred to as 0.1-20 micrometers.

[0063] As for the ferroelectricity thin film and antiferroelectricity thin film which are used for a variable-capacity element at least, in this invention, it is desirable that it is the epitaxial film explained below. As indicated by Jpn.J.Appl.Phys.Vol.36 (1997) pp.6069-6072 Although direct current voltage, or the dielectric constant and the piezo-electric property after low frequency voltage impression changes with sizes of applied voltage and the conventional ferroelectricity thin film, for example, the PZT thin film produced by the sol gel process, has a problem in repeatability In the epitaxial film explained below, as shown in the aforementioned example, neither a dielectric constant nor a piezo-electric property is influenced by direct current voltage or low frequency voltage impression, but good repeatability is obtained.

[0064] Hereafter, the ferroelectricity thin film and antiferroelectricity thin film which are an epitaxial film are named a functional epitaxial film generically.

[0065] Although what is necessary is just to choose from what especially the material used for a functional epitaxial film is not limited, but has a ferroelectricity or antiferroelectricity suitably, the following material is suitable, for example.

[0066] (A) Perovskite die materials :  $\text{BaTiO}_3$  ;P Pb system perovskite compound;Bi system perovskite compounds, such as  $\text{bTiO}_3$ , a rare-earth-elements content lead titanate, PZT (zircon lead titanate), and PLZT (zircon titanate-acid lanthanum lead) etc. The above simplicity, composite, various stratified perovskite compounds.

[0067] (B) Tungsten-bronze die materials : tungsten-bronze type oxides, such as SBN (niobic-acid strontium barium) and PBN (niobic-acid lead barium) etc.

[0068] (C)  $\text{YMnO}_3$  system material : the oxide which has hexagonal system  $\text{YMnO}_3$  structure including rare earth elements (Sc and Y are included), and Mn and O. For example,  $\text{YMnO}_3$ ,  $\text{HoMnO}_3$  grade.

[0069] Hereafter, such material is explained more to a detail.

[0070] Generally  $\text{BaTiO}_3$ , Pb content perovskite compound, etc. are expressed with a formula  $\text{ABO}_3$  among perovskite die materials. Here, A and B express a cation respectively. As for A, it is desirable that they are one or more sorts chosen from calcium, Ba, Sr, Pb, K, Na, Li, La, and Cd, and, as for B, it is desirable that they are one or more sorts chosen from Ti, Zr, Ta, and Nb.

[0071] Atomic-ratio A/B in such a perovskite type compound is 0.8-1.3 preferably, and is 0.9-1.2 more preferably.

[0072] Since it becomes possible to be able to secure the insulation of a dielectric and to improve crystallinity by making A/B into such a range, a dielectric property or strong dielectric characteristics is improvable. On the other hand, less than by 0.8, if it becomes impossible to desire an improvement effect of crystallinity [ A/B ] and A/B surpasses 1.3, formation of a homogeneous thin film will become difficult.

[0073] Such A/B is realized by controlling membrane formation conditions. Moreover, the ratio of O in  $\text{ABO}_3$  is not limited to 3. Since there are some which construct the perovskite structure stabilized in an

oxygen defect or hyperoxia depending on perovskite material, in  $ABO_x$ , the value of  $x$  is usually 2.7 to about 3.3. In addition,  $A/B$  can be calculated from an X-ray fluorescence analysis.

[0074] As an  $ABO_3$  type perovskite compound used by this invention  $A A_1+B_5+O_3$ ,  $A_2+B_4+O_3$ , and  $A_3+B_3+O_3$ ,  $AXBO_3$ ,  $A (B^{0.67}B^{0.33})O_3$ ,  $A (B^{0.33}B^{0.67})O_3$ ,  $A (B_{0.5}+3B_{0.5+5})O_3$ , and  $A (B_{0.52}+B_{0.56+})O_3$  --  $(B_{0.51}+B_{0.57+})$  You may be any of  $O_3$ ,  $A_3+(B_{0.52}+B_{0.54+}) O_3$ ,  $A (B_{0.251}+B_{0.755+})O_3$ ,  $A (B_{0.53}+B_{0.54+})O_{2.75}$ , and  $A(B_{0.52}+B_{0.55+}) O_{2.75}$  grade.

[0075] Specifically, they are Pb system perovskite compounds, such as PZT and PLZT,  $CaTiO_3$ ,  $BaTiO_3$ ,  $PbTiO_3$ ,  $KTaO_3$ ,  $BiFeO_3$ ,  $NaTaO_3$ ,  $SrTiO_3$ ,  $CdTiO_3$ ,  $KNbO_3$ ,  $LiNbO_3$  and  $LiTaO_3$ , these solid solutions, etc.

[0076] In addition, Above PZT is the solid solution of  $PbZrO_3$ - $PbTiO_3$  system. Moreover, Above PLZT is the compound with which La was doped by PZT, and if the notation of  $ABO_3$  is followed, it is shown by  $O(Zr(Pb_{0.89-0.91}La_{0.11-0.09})_{0.65}Ti_{0.35})_3$ .

[0077] Moreover, generally Bi system stratified compound is a formula among stratified perovskite compounds. It is expressed with  $Bi_2Am-1BmO_{3m+3}$ . In the above-mentioned formula,  $m$  is the integer of 1-5,  $A$  is either Bi, calcium, Sr, Ba, Pb, Na, K and rare earth elements (Sc and Y are included), and  $B$  is either Ti, Ta and Nb. Specifically,  $Bi_4Ti_3O_{12}$ ,  $SrBi_2Ta_2O_9$ ,  $SrBi_2Nb_2O_9$ , etc. are mentioned. In this invention, any of these compounds may be used and these solid solutions may be used.

[0078] The perovskite type compound with desirable using for this invention A titanate or a titanate content perovskite type compound,  $BaTiO_3$  and  $SrTiO_3$ , PLZT, [ for example, ] They are PZT,  $CaTiO_3$ ,  $PbTiO_3$  (lead titanate), a rare-earth-elements content lead titanate, etc. More desirable things are  $BaTiO_3$ ,  $SrTiO_3$ , PZT,  $PbTiO_3$ , and a rare-earth-elements content lead titanate. especially a desirable thing It is the rare-earth-elements content lead titanate which contains O in R (at least one sort of rare earth elements as which R was chosen from Pr, Nd, Eu, Tb, Dy, Ho, Yb, Y, Sm, Gd, Er, and La), Pb, and Ti row.

[0079] As such a rare-earth-elements content lead titanate, what has the percentage of an element in the range of  $(Pb+R)/Ti=0.8-1.3$  and  $Pb/(Pb+R)=0.5-0.99$  is desirable. The rare-earth-elements content lead titanate of this composition is indicated by JP,10-17394,A.

[0080] As tungsten-bronze die materials, the tungsten-bronze die materials of Landolt-Boernstein Vol.16 publication of the collection of ferroelectric material are desirable. Specifically, Nb (Ba, Sr)  $2O_6$ , Nb (Ba, Pb)  $2O_6$ ,  $PbNb_2O_6$ ,  $PbTa_2O_6$ ,  $BaTa_2O_6$ ,  $PbNb_4O_{11}$ ,  $SrNb_2O_6$ ,  $BaNb_2O_6$  grades, and these solid solutions are desirable, and SBN  $\{(Ba, Sr)_Nb_2O_6\}$  and PBN  $\{(Ba, Pb)_Nb_2O_6\}$  are desirable especially.

[0081]  $YMnO_3$  system material can be expressed with a chemical formula  $RMnO_3$ . As for R, it is desirable that they are one or more sorts chosen from rare earth elements (Sc and Y are included). Atomic-ratio  $R/Mn$  in  $YMnO_3$  system material is 0.8-1.2 preferably, and is 0.9-1.1 more preferably. Since it becomes possible to be able to secure insulation and to improve crystallinity by making it such a range, strong dielectric characteristics are improvable. On the other hand, there is an inclination for crystallinity to fall, in the range in which atomic-ratio  $R/Mn$  exceeds less than 0.8 and 1.2. Moreover, especially in the range in which atomic-ratio  $R/Mn$  exceeds 1.2, a ferroelectricity is not acquired, but there is an inclination which becomes a usual state dielectric property, and the application to the element using polarization may become impossible.  $R/Mn$  of such a range is realizable by controlling membrane formation conditions. In addition,  $R/Mn$  can be calculated by X-ray fluorescence. The specific inductive capacity of  $YMnO_3$  system material is ten to about 100 in ten to about 50, and a thin film at bulk.

[0082] The crystal structure of the  $YMnO_3$  system material with desirable using for this invention is the thing of hexagonal system.

[0083] That in which  $YMnO_3$  system material has the crystal structure of hexagonal system, and a thing with the crystal structure of orthorhombic system exist. In order to acquire a ferroelectricity, it is necessary to consider as the crystal material of hexagonal system. Specifically, composition is what is  $YMnO_3$ ,  $HoMnO_3$ ,  $ErMnO_3$ ,  $YbMnO_3$ ,  $TmMnO_3$ , and  $LuMnO_3$  substantially, these solid solutions, etc.

[0084] As for a functional epitaxial film, it is desirable to have the perovskite crystal structure and to

have orientation at least (001). (001) As for many of  $\text{PbTiO}_3$  system material which  $\langle 001 \rangle$  shafts are perpendicular to the field inboard of a functional epitaxial film, and has the crystal structure of a perovskite system, it is more desirable that a ferroelectricity is a single (001) orientation film with a field (001) parallel in a film surface in orientation since it is obtained with  $\langle 001 \rangle$  shafts.

[0085] In addition, the single orientation film in this specification means the thing of the crystallization film with which the target crystal face is equal to a substrate front face and parallel. concrete -- for example, a single (001) orientation film, i.e., a c-th plane single orientation film, -- membranous 2 theta-theta X diffraction -- setting -- 10% or less of the maximum peak intensity of field (00L) reflection of reflectivity other than a field (00L) -- desirable -- 5% or less of thing -- it is . in addition, this specification -- setting (00L) -- etc. (002) etc. -- it is the display which names an equivalent field generically (001)

[0086] The epitaxial film in this specification is a crystallization film with which the target crystal face is equal to a substrate front face and parallel, and when the inside of a film surface is made into a X-Y side and the Z-axis is set as the direction of thickness, the crystal is gathering and carrying out orientation to both the X-axis, a Y-axis, and Z shaft orientations. It is necessary to be specifically the single orientation film described above in the first place. RHEED evaluation needs to show a spot or a streak pattern to the second. It can be called an epitaxial film if these conditions are satisfied. In addition, RHEED is a reflective high-speed electron diffraction (Reflection High Energy Electron Diffraction), and RHEED evaluation is the index of the orientation of the crystallographic axis in a film surface.

[0087] However, in this invention, the crystal of the orientation which is parallel in a film surface may be intermingled into the orientation (001) crystal. (100) Although an orientation crystal may form 90-degree domain and decreases spontaneous polarization slightly in this case, it does not become a serious obstacle. Moreover, if 90-degree domain is formed, since the stress in a thin film will decrease, it is sometimes effective for improvement in a ferroelectric property. As for the peak intensity ratio in an X diffraction, it is usually desirable that (100)/(001) is three or less.

[0088] In addition, it shall be included by the epitaxial film defined in this specification, when the intermingled crystal is orientation (100), even if it is not single (001) orientation. 10% or less of the maximum peak intensity of the field which the peak intensity of reflection of things other than two fields made into the purpose makes the purpose with the epitaxial film in this case when measurement by the X diffraction is performed in the first place -- desirable -- 5% or less -- it is necessary to be . concrete -- membranous 2 theta-theta X diffraction -- setting -- peak intensity other than a field (00L) and (H00) a field -- 10% or less of the maximum peak intensity of a field (00L) or (H00) a field -- desirable -- 5% or less -- it is . RHEED evaluation needs to show a spot or a streak pattern to the second. If these conditions are satisfied, suppose that it is the epitaxial film defined in this specification. in addition, this specification -- setting (H00) -- etc. (200) etc. -- it is the display which names an equivalent field generically (100)

[0089] The desirable crystallographic-axis orientation relationship of the functional epitaxial film in the case of using Si (100) substrate and Si (100) substrate is as follows. In addition, Si is a cubic. When the functional epitaxial film of a perovskite structure is single (001) orientation, they are perovskite  $[100]//\text{Si } [010]$ . Moreover, when orientation (001) and orientation (100) are intermingled, functional epitaxial films are perovskite  $[100]//\text{Si } [010]$  about a perovskite (001) orientation crystal, and are perovskite  $[001]//\text{Si } [010]$  about a perovskite (100) orientation crystal. That is, as for a functional epitaxial film and Si substrate, it is desirable that the shafts which exist in a field are parallel.

[0090] It is desirable to prepare a buffer layer between a buffer-layer substrate and a functional epitaxial film, as shown in the aforementioned example. Moreover, when preparing a ground electrode, as for a buffer layer, preparing between a ground electrode and a substrate is desirable. the [ the 1st buffer layer which explains a buffer layer below, and/or ] -- it is desirable that 2 buffer layers are included

[0091] (The 1st buffer layer) The 1st buffer layer has the perovskite crystal structure expressed with said formula  $\text{ABO}_3$ . As A, one or more sorts of calcium, Ba, Sr, Pb, K, Na, Li, La, and Cd, especially Ba or Sr is desirable, and one or more sorts, especially Ti of Ti, Zr, Ta, and Nb are desirable as B. That is, as

for the 1st buffer layer, it is desirable to make a barium titanate or a strontium titanate into a principal component.

[0092] atomic-ratio A/B in the 1st buffer layer -- desirable -- 0.8-1.3 -- it is 0.9-1.2 more preferably Less than by 0.8, if it becomes impossible to desire an improvement effect of crystallinity [ A/B ] and A/B exceeds 1.3, formation of a homogeneous thin film will become difficult. It can ask for the composition ratio of A/B by X-ray fluorescence. The ratio of O in ABO<sub>3</sub> should just be in the range not only of 3 but 2.7-3.3, as described above.

[0093] It is desirable that the c-th page carries out orientation to single (001) orientation, i.e., a substrate front face, and parallel individually when it is a tetragonal phase, and when it is a cubic, it is desirable that the a-th page carries out orientation to single (100) orientation, i.e., a substrate front face, and parallel individually, and even when it is any, it is more desirable [ the 1st buffer layer ] that it is an epitaxial film. Moreover, as for the orientation relationship of the 1st buffer layer and Si (100) substrate, it is desirable that they are tetragonal [100]// Si [010], or cubic [010]//Si [010]. That is, as for a buffer layer and a substrate, it is desirable that shafts are parallel in a field. Such a laminated structure is effective for raising the crystallinity of the ground electrode further formed on this structure, or a functional epitaxial film, and forming these as a single orientation film or an epitaxial film. Since the 1st buffer layer has good grid adjustment with a functional epitaxial film, a crystalline functional high epitaxial film is obtained.

[0094] (The 2nd buffer layer) When preparing the 1st buffer layer and the 2nd buffer layer, the 2nd buffer layer is prepared between a substrate and the 1st buffer layer. The 2nd buffer layer is constituted from a zirconium-oxide system thin film explained below, or consists of this and a rare earth oxide system thin film explained below. In addition, when preparing both thin films, a rare earth oxide system thin film is prepared in a functional epitaxial film side.

[0095] A zirconium-oxide system thin film makes a principal component the zirconium oxide (stabilized zirconia) which made the zirconium oxide the principal component or was stabilized by rare earth elements (Sc and Y are included). By preparing this thin film, ablation of the 1st buffer layer prepared on it or a functional epitaxial film can be prevented. Moreover, since this thin film has good grid adjustment with the 1st buffer layer which consists of a barium titanate etc., it can form a crystalline functional high epitaxial film as a result.

[0096] A zirconium oxide and a stabilized zirconia have the desirable thing of the composition expressed with Zr<sub>1-x</sub>R<sub>x</sub>O<sub>2- $\delta$</sub>  (R is the rare earth elements containing Sc and Y, and is x= 0 to 0.75, and  $\delta$ =0-0.5). About the reason for limitation of x and  $\delta$ , it mentions later. It is desirable that it is at least one sort chosen from Pr, Ce, Nd, Gd, Tb, Dy, Ho, and Er as R.

[0097] As for a zirconium-oxide system thin film, it is desirable to have single crystal orientation. Since a grain boundary exists in the thin film which has two or more crystal faces, this is because the 1st buffer layer on it and epitaxial growth of a functional epitaxial film become impossible. Specifically, when it is a tetragonal phase or monoclinic system and is single (001) orientation and a cubic, it is desirable that it is single (100) orientation, and even when it is any, it is more desirable that it is an epitaxial film. If such a good crystalline zirconium-oxide system thin film can be formed, the disturbance of the physical quantity by the grain boundary etc. will be lost, and the 1st good buffer layer, a ground electrode, and a functional epitaxial film will be obtained on a zirconium-oxide system thin film.

[0098] When Si (100) substrate front face is reached the 2nd buffer layer (Zr<sub>1-x</sub>R<sub>x</sub>O<sub>2- $\delta$</sub> ) and the laminating of the 1st buffer layer (BaTiO<sub>3</sub>) is carried out one by one, as for these orientation relationships, it is desirable that they are BaTiO<sub>3</sub>(001)//Zr<sub>1-x</sub>R<sub>x</sub>O<sub>2- $\delta$</sub> (001)// Si (100), and BaTiO<sub>3</sub> [100]//Zr<sub>1-x</sub>R<sub>x</sub>O<sub>2- $\delta$</sub> [100]// Si [010]. this -- the [ the 2nd buffer layer and ] -- although it is the case where each of 1 buffer layers is tetragonal phases, even when these thin films are cubics, it is the same at the point that it is desirable that shafts are parallel in a field

[0099] When it is going to obtain the BaTiO<sub>3</sub> epitaxial film of orientation (001), in the analogy from the conventional examples, such as YBCO, the orientation relationship BaTiO<sub>3</sub>(001)//Zr<sub>1-x</sub>R<sub>x</sub>O<sub>2- $\delta$</sub> (001)// Si (100), And it is set to BaTiO<sub>3</sub> [110]//Zr<sub>1-x</sub>R<sub>x</sub>O<sub>2- $\delta$</sub> [100]// Si [010], and it is presumed that



45 degrees rotates within the c-th page to the grid of  $Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}$ , and the unit lattice of  $BaTiO_3$  can take adjustment of a grid, and grows epitaxially. However, according to the experiment of this invention persons, such an orientation relationship is difficult to constitute and it found out growing epitaxially by the relation between  $BaTiO_3(001)//Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}(001)//Si(100)$ , and  $BaTiO_3[100]/Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}[100]/Si[010]$ . Since the a-axis of a  $Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}$  film is 0.52nm and the a-axis of  $BaTiO_3$  film is 0.40nm, in the relation between  $BaTiO_3[110]/Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}[100]/Si[010]$  which rotates and carries out grid adjustment in 45-degree side, misfit becomes 8.4%. on the other hand, in  $BaTiO_3[100]/Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}[100]/Si[010]$  found out in the experiment by this invention persons The a-th page of  $BaTiO_3$  crystal and the a-th page of a  $Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}$  crystal are adjusted as they are, without rotating, and  $BaTiO_3$  grid ( $0.40 \times 4 = 1.60$ [nm]) adjusts it to  $Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}$  grid ( $0.52 \times 3 = 1.56$ [nm]) in this case. At this time, misfit is 2.6% and is matched well. Thus, epitaxial  $BaTiO_3$  film of orientation (001), i.e., the 1st buffer layer excellent in crystallinity, can be obtained by using the relation between  $BaTiO_3[100]/Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}[100]/Si[010]$ .

[0100]  $ZrO_2$  It applies to a room temperature from an elevated temperature, and cubic  $\rightarrow$  tetragonal  $\rightarrow$  monoclinic system and phase transition are produced. It is the stabilized zirconia which added rare earth elements in order to stabilize a cubic. It depends for the crystallinity of a  $Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}$  film on the range of x. x becomes a tetragonal phase or a monoclinic system crystal in the composition region which is less than 0.2 as reported to Jpn.J.Appl.Phys.27(8) L1404-L1405 (1988). Until now, in 0.2 or more cubic fields, the epitaxial film of single orientation is obtained for x. However, although x is a cubic in the field exceeding 0.75, single orientation is not acquired but the crystal of orientation (111) mixes it, for example (100). On the other hand, in the field used as a tetragonal phase or monoclinic system, orientation sides other than what it is going to obtain mix, and the epitaxial film of single orientation is not obtained as stated also to J.Appl.Phys.58(6)2407-2409 (1985).

[0101] Therefore, as for x, from the point of crystal orientation, it is desirable in  $Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}$  that it is 0.2-0.75. The more desirable ranges of x in this case are 0.2-0.50. If a zirconium-oxide system thin film is an epitaxial film, it will be easy to grow epitaxially the 1st buffer layer formed on it, a ground electrode, and a functional epitaxial film.

[0102] In order for the rare earth elements which the stabilized zirconia which constitutes a zirconium-oxide system thin film contains to make the lattice constant of the thin film prepared on the lattice constant of a substrate, and a zirconium-oxide system thin film, and the lattice constant of a zirconium-oxide system thin film match preferably, the kind and addition are chosen. For example, as for with an above-mentioned lattice constant of 0.52nm  $Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}$ , R is Y and x is the thing of 0.3. Although a lattice constant is changeable if x is changed with the kind of R fixed, the field of matching in change of only x which can be adjusted is narrow. Here, if it changes to Y and Pr is used, it is possible to enlarge a lattice constant and matching with  $BaTiO_3$  crystal of the 1st buffer layer can be optimized.

[0103] In addition, although the zirconium oxide which does not include an oxygen defect is expressed with a chemical formula  $ZrO_2$ , it becomes the range in which the amount of oxygen changed and usually described above delta in  $Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}$  with the kind, amount, and valence of the rare earth elements which added the zirconium oxide which added rare earth elements.

[0104] In  $Zr_{1-x}R_xO_{2-\delta}$ , as mentioned above, crystallinity did not become fitness, and good front-face nature was not obtained in the field whose x is less than 0.2, and especially the composition region of a high grade where the ratio of Zr in the composition element except oxygen exceeds 93-mol%, either. However, by applying the manufacture method indicated by aforementioned JP,10-17394,A as a result of this invention persons' repeating examination, epitaxial growth of the above-mentioned single orientation and the above-mentioned further was attained, and they also understood front-face nature that a bird clapper is good. There is a merit which is described below in  $ZrO_2$  film of a high grade.

[0105] Insulation resistance also becomes high, so that the purity of  $ZrO_2$  is so high that the ratio of Zr in the composition element except oxygen is high, and a leakage current is also small, and  $ZrO_2$  film of a bird clapper to a high grade is desirable when it needs an insulating property. Moreover, since the hysteresis of the C-V property of seeing when YSZ (Y stabilized zirconia) is used as an insulator is lost when  $ZrO_2$  is used as an insulator in metal 1 insulator 1 semiconductor structure (MIS structure), an

interface property is excellent as an MIS element. It is possible that the stress generated by the difference in a coefficient of thermal expansion between Si substrate and a zirconium-oxide system thin film is eased by the phase transition of  $\text{ZrO}_2$  as this reason, and that there are few oxygen defects of  $\text{ZrO}_2$ . Since stress was not eased since there was no phase transition, and YSZ has added rare earth elements, it has many oxygen defects.

[0106] therefore -- when good crystallinity and front-face nature are obtained, so that the ratio of Zr in the composition element except the oxygen in a zirconium-oxide system thin film is high -- desirable -- concrete -- desirable -- 93mol% \*\* -- more -- desirable -- more than 95mol% -- further -- desirable -- more than 98mol% -- it is more than 99.5mol% most preferably In addition, oxygen and the composition element except Zr are usually rare earth elements, P, etc. Now, the upper limit of the ratio of Zr is about 99.99mol%. Moreover, with the present high grade-ized technology, since separation with  $\text{ZrO}_2$  and  $\text{HfO}_2$  is difficult, the purity of  $\text{ZrO}_2$  has usually pointed out the purity in  $\text{Zr}+\text{Hf}$ . Therefore, although the purity of  $\text{ZrO}_2$  in this specification is the value computed by having considered that Hf and Zr were these elements, since  $\text{HfO}_2$  functions completely like  $\text{ZrO}_2$  in the zirconium-oxide system thin film in this invention, a problem does not have it.

[0107] In addition, when forming the 2nd buffer layer, the oxygen in the 2nd buffer layer is spread near the front face of Si single crystal substrate, near a substrate front face oxidizes shallowly (for example, about 5nm or less), and oxidizing zones, such as  $\text{SiO}_2$ , may be formed. Moreover, depending on the method of membrane formation, Si oxide layer may remain on Si substrate front face at the time of the 2nd buffer stratification. In the aforementioned example, the silicon-oxide layer of the buffer layer of a three-tiered structure which exists in a substrate side most is carried out in this way, and is formed.

[0108] Next, a rare earth oxide system thin film is explained.

[0109] As described above, when the stabilized zirconia described above as the 2nd buffer layer is used, a hysteresis is seen by the C-V property and it is inferior to a  $\text{ZrO}_2$  high-grade film in this point. In this case, the hysteresis of a C-V property can be abolished by carrying out the laminating of the rare earth oxide system thin film on a zirconium-oxide system thin film. Moreover, matching of the grid adjustment between functional epitaxial films becomes better by carrying out the laminating of the rare earth oxide system thin film.

[0110] In addition, a rare earth oxide system thin film is formed on a zirconium-oxide system thin film because the film of single (001) orientation or single (100) orientation cannot be formed but it becomes the film of cubic orientation (111) only by the rare earth oxide system thin film.

[0111] As for a rare earth oxide system thin film, it is desirable to consist of substantially rare earth oxides of Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, and Lu which contain at least one sort of Ce, Pr, Nd, Gd, Tb, Dy, Ho, and Er especially at least one sort. In addition, the ratio is arbitrary when using two or more sorts of rare earth elements.

[0112] When the laminating of the rare earth oxide system thin film is carried out, an element distribution may be a uniform film and a zirconium-oxide system thin film may be an inclination structure film from which composition changes in the direction of thickness. When considering as an inclination structure film, while applying to a rare earth oxide system thin film side from a substrate side and increasing gradually or gradually the rare-earth-elements content in a zirconium-oxide system thin film, Zr content is decreased gradually or gradually. By considering as such an inclination structure film, it becomes easy for the misfit of the grid between a zirconium-oxide system thin film and a rare earth oxide system thin film to become small, or to stop existing, and to make a rare earth oxide system thin film into the epitaxial film of high crystallinity.

[0113] In addition, as for the rare earth elements added to a rare earth oxide system thin film, it is desirable to use the same thing as the rare earth elements added to a zirconium-oxide system thin film.

[0114] You may introduce an additive into a zirconium-oxide system thin film and a rare earth oxide system thin film for a property improvement. For example, if alkaline-earth elements, such as calcium and Mg, are doped to these thin films, a membranous pinhole can decrease and leak can be suppressed. Moreover, aluminum and Si are effective in raising membranous resistivity. Furthermore, transition-metals elements, such as Mn, Fe, Co, and nickel, can form the level (trap level) by the impurity into a

film, and conductive control is attained by using this level.

[0115] The ground electrode prepared by sticking to a functional epitaxial film between a ground electrode substrate and a functional epitaxial film functions as a lower electrode for constituting structure required for the electrode for functional epitaxial films, and device application of a functional epitaxial film.

[0116] Although it is desirable to consist of metals as for a ground electrode, you may be the oxide and the conductive perovskite oxide containing In, and it is good also as composition which carried out the laminating of a metal membrane and the oxide film. As a metal, the metal simple substance and alloy containing at least one sort of Pt, Ir, Os, Re, Pd, Rh, and Ru are desirable. As the oxide containing In, or a conductive perovskite oxide,  $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$  (Sn dope),  $\text{CoO}$  (R, Sr) $_3$ ,  $\text{RuO}$  (R, Sr, calcium) $_3$ ,  $\text{RuO}$  (R, Sr) $_3$ ,  $\text{SrRuO}_3$  and  $\text{MnO}$  (R, Sr) $_3$ , or these related compounds are desirable, for example. In addition, in these compounds, R is the rare earth elements containing Sc and Y.

[0117] Like the 1st buffer layer, when it is a tetragonal phase and they are single (001) orientation and a cubic, it is desirable that it is single (100) orientation, and even when it is any, as for a ground electrode, it is more desirable that it is an epitaxial film. Moreover, as for the orientation relationship of a ground electrode and Si (100) substrate, it is desirable that they are tetragonal [100]// Si [010], or cubic [010]//Si [010]. That is, as for a thin film and a substrate, it is desirable that shafts are parallel in a field. Such a laminated structure is effective for raising the crystallinity of the functional epitaxial film further formed on this structure, and forming as a single orientation film or an epitaxial film. Since a ground electrode has good grid adjustment with a functional epitaxial film, a crystalline functional high epitaxial film is obtained.

[0118] As for a ground electrode, it is desirable that the specific resistance in bulk is  $10^{-5}$  -  $10^{-2}$  ohmcm. Moreover, it is desirable that they are the specific resistance  $10^{-5}$  as a thin film -  $10^{-2}$  ohmcm. In addition, the ground electrode may consist of superconducting materials.

[0119] In order that the crystallinity of each thin film and a ground electrode, front-face nature and a thickness ground electrode, and a buffer layer may raise the crystallinity of the thin film formed on it, its crystallinity is good and it is desirable that a front face is flat.

[0120] The half-value width of the rocking curve of the reflective peak in an X diffraction and the pattern of the image by RHEED can investigate the crystallinity of a thin film. Moreover, front-face nature can be investigated by the streak nature of a RHEED image, and the surface roughness (ten-point average of roughness height) measured by AFM (atomic force microscope).

[0121] As for the thickness of a ground electrode, it is usually desirable to be referred to as 50-500nm. Moreover, as for about 5-200nm and the 2nd buffer layer thickness, it is [ the 1st buffer layer thickness ] desirable to be referred to as about 5-50nm.

[0122] It is desirable to use a vacuum deposition, the MBE method, the RF magnetron-sputtering method, etc. for formation of the formation method functionality epitaxial film, a buffer layer, and a ground electrode, and it is desirable to use the method especially indicated by aforementioned JP,10-17394,A.

[0123]

[Effect of the Invention] VCO consists of this inventions by the amount of stored charges considering as a variable-capacity element on both sides of the ferroelectricity thin film or antiferroelectricity thin film which shows a history to applied voltage by the electrode of a couple, and connecting an oscillation element (a piezo-electric bulk oscillating element or surface-acoustic-wave resonator) to this variable-capacity element in series. That is, this invention is based on the completely new way of thinking [ say / using the above-mentioned variable-capacity element as an alternative of varactor diode ]. These problems are solved, when a resistance component increases, Q becomes low sharply in an about 2GHz RF field, and the variable-capacity element of this invention is used for varactor diode, although there is a problem that C/N falls.

[0124] In this invention, since a ferroelectric material and antiferroelectricity material are thin-film-ized and are used in a variable-capacity element, it can be made to operate on the voltage of several volts, and sufficient frequency adjustable width of face is obtained.

[0125] Moreover, since it is possible to form a variable-capacity element and an oscillation element in one in this invention and monolithic-izing with a semiconductor device is also possible, it is advantageous to a miniaturization.

[0126] Furthermore, by making a ferroelectricity thin film and an antiferroelectricity thin film into an epitaxial film in a variable-capacity element, Q big enough is obtained also in a 1.5-2GHz band, and the stability of a property becomes good.

---

[Translation done.]

**\* NOTICES \***

Japan Patent Office is not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. \*\*\*\* shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

---

**PRIOR ART**

---

[Description of the Prior Art] Since mobile communications which used the 1.9GHz band from the 800MHz band, such as a cellular phone and PHS, spread quickly and correspond to the increase of a subscriber recently, and in order to realize the telephone of a cosmopolitan, introduction of new specification, such as IMT2000 system, is considered. Introduction of the system to 2Mbps(es) is considered for the maximum bit rate as a phase 1 by this IMT2000 system. The wideband CDMA method which extended bandwidth to 5MHz / 10MHz / 20MHz, and the TDMA method which incorporated frequency hopping were examined by this system. Since the direct diffusion sign is used for the former, in the present condition, the limitation of use bandwidth is called 5 to 10MHz by interference of the multiplex propagation path of an electric wave, and its development of new interference cancellation technology is indispensable. The high-speed frequency synthesizer for frequency hopping is required, and the latter operates to this frequency synthesizer with the 2GHz band of center frequency, and needs for it the VCO (voltage controlled oscillator) circuit whose frequency adjustable width of face is 5MHz to 20MHz (from 0.25% of standardization frequency adjustable width of face to 1%).

[0003] The terminal of these systems is strongly required to be smaller than before, in order to raise convenience. The miniaturization of the parts to be used is indispensable to the miniaturization of a terminal. About the miniaturization of a VCO circuit used for a frequency synthesizer, although it is thought from the conventional discrete part that bare chip mounting and a further have effective monolithic-izing, it is necessary to conquer various technical problems, and utilization is not progressing easily.

[0004] By the way, the piezo-electric bulk oscillating element and surface-acoustic-wave resonator using single crystal piezoelectric material have the features, like resonance loss is small in small, no adjusting, and Quantity Q, and are used for the VCO circuit combining varactor diode.

[0005] However, the application to the communication system which uses a 2GHz band since the usable frequency range is hundreds of MHz or less for the VCO circuit using the piezo-electric bulk oscillating element using the single crystal of LiTaO<sub>3</sub> grade is impossible. On the other hand, the VCO circuit using the surface-acoustic-wave resonator is studied even to the 900MHz band. However, on the frequency of a 2GHz band, a resistance component increases, Q becomes low sharply, as for the varactor diode which is the key parts of a frequency adjustable element, C/N falls, and a practical property is not acquired.

---

[Translation done.]

**\* NOTICES \***

Japan Patent Office is not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. \*\*\*\* shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

---

**DESCRIPTION OF DRAWINGS**

---

**[Brief Description of the Drawings]**

[Drawing 1] It is the cross section showing VCO of the 1st example.

[Drawing 2] It is the graph which shows the hysteresis curve of the amount of stored charges in the 1st example.

[Drawing 3] It is the graph which shows the applied-voltage dependency of the capacity in the 1st example.

[Drawing 4] It is a circuit diagram for explaining operation of VCO of this invention.

[Drawing 5] It is the graph which shows the frequency response of the impedance in the 1st example.

[Drawing 6] It is the graph which shows the applied-voltage dependency of the impedance in the 1st example.

[Drawing 7] It is the cross section showing VCO of the 2nd example.

[Drawing 8] It is the graph which shows the applied-voltage dependency of the impedance in the 2nd example.

[Drawing 9] (A) - (D) is a cross section for explaining the manufacturing process of VCO of the 3rd example, and (E) is the cross section showing VCO of the 3rd example.

[Drawing 10] It is the graph which shows the hysteresis curve of the amount of stored charges in the 3rd example.

[Drawing 11] It is the cross section showing VCO of the 4th example.

[Drawing 12] It is the graph which shows the applied-voltage dependency of the impedance in the 4th example.

[Drawing 13] It is the conceptual diagram of a phase synchronous loop.

[Drawing 14] It is the graph which shows change of the frequency response curve of the impedance imaginary part by connection of a variable-capacity element.

**[Description of Notations]**

- 1 Diaphragm
- 2 Si Substrate
- 21 KNbO<sub>3</sub> Single-Crystal Substrate
- 3 Buffer Layer
- 4 Ground Electrode
- 5, 51, 52 A ferroelectricity and piezoelectric thin film
- 53 Antiferroelectricity Thin Film
- 54 Dielectric Thin Film
- 61 62 Up electrode
- 63 Kushigata Electrode
- 10 Die Bond Agent
- 11 Package
- 12 Wire
- 13 Lid

100 Phase Contrast Detector  
101 Loop Filter  
102 Amplifier  
103 VCO  
200 Active Circuit  
201 Oscillation Element  
202 Variable-Capacity Element  
A, B, C External end-connection child

---

[Translation done.]

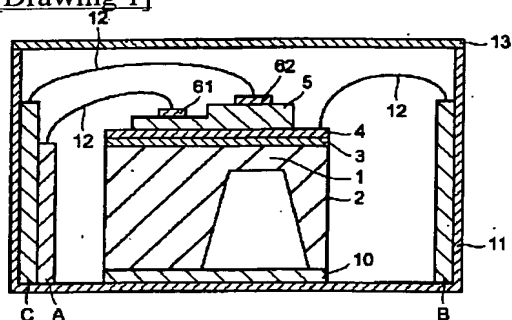
## \* NOTICES \*

Japan Patent Office is not responsible for any damages caused by the use of this translation.

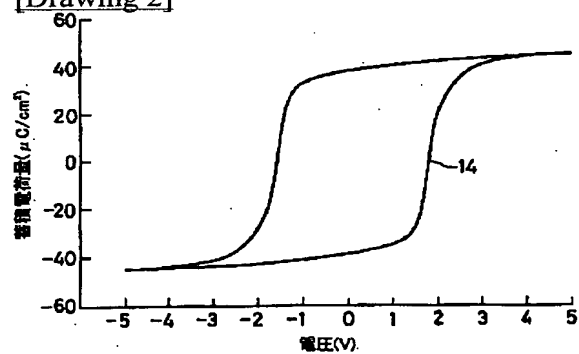
1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. \*\*\*\* shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

## DRAWINGS

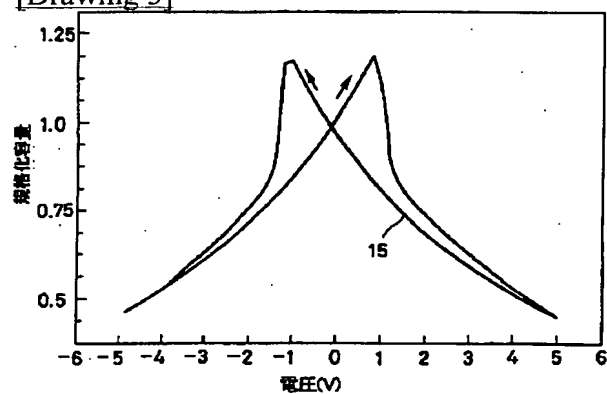
[Drawing 1]



[Drawing 2]

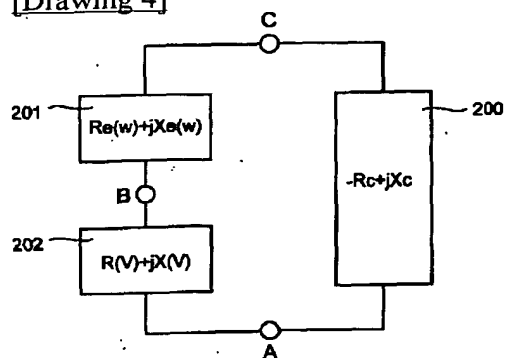


[Drawing 3]

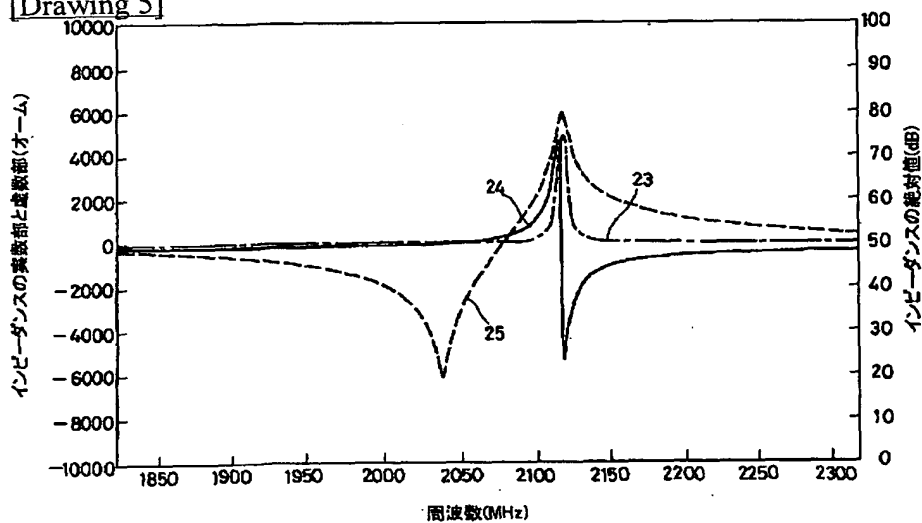




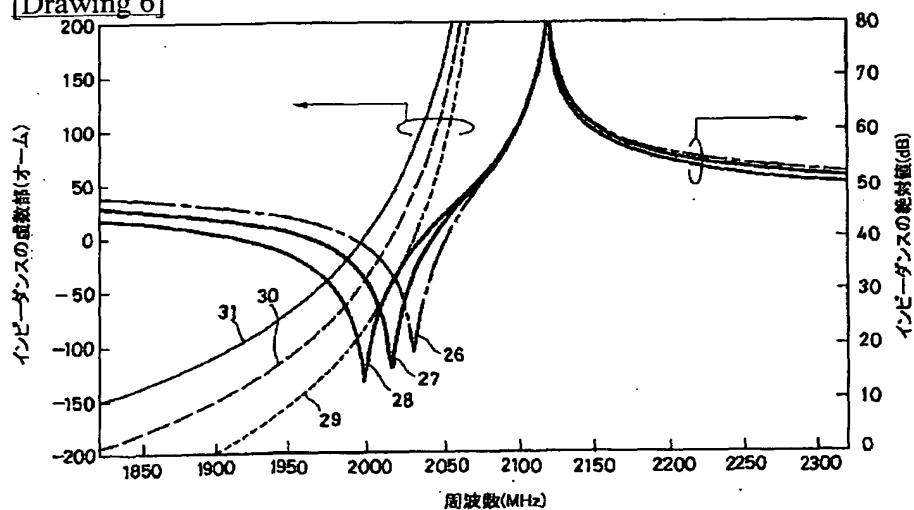
[Drawing 4]



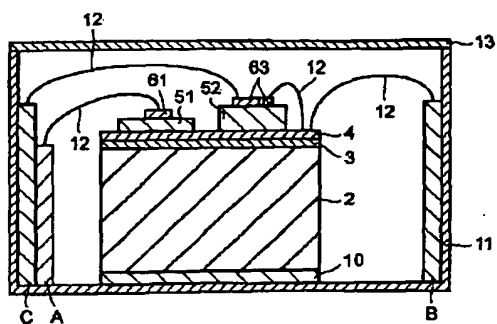
[Drawing 5]



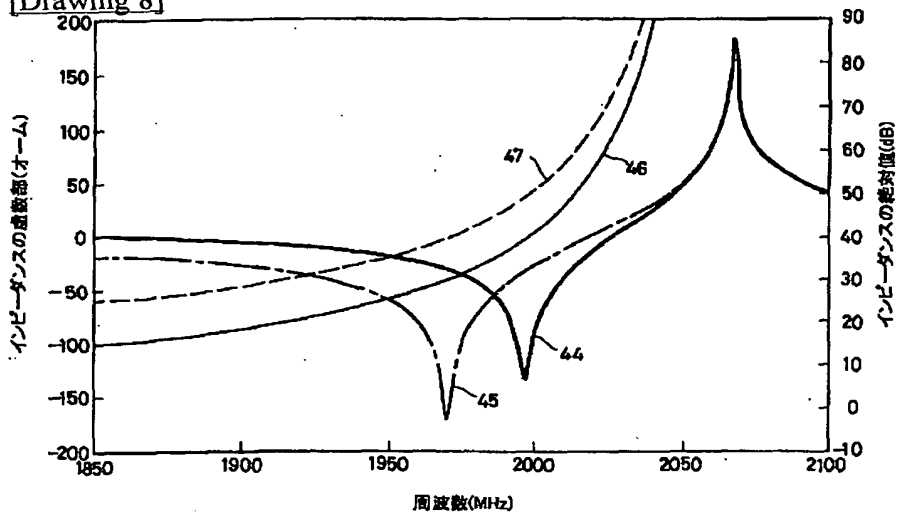
[Drawing 6]



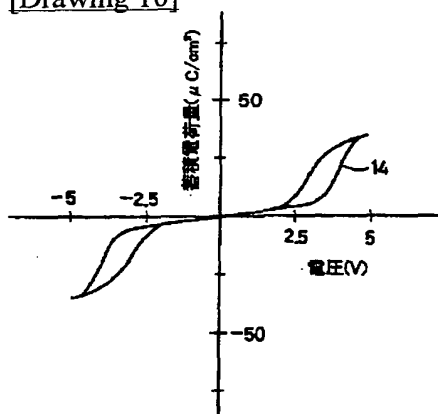
[Drawing 7]



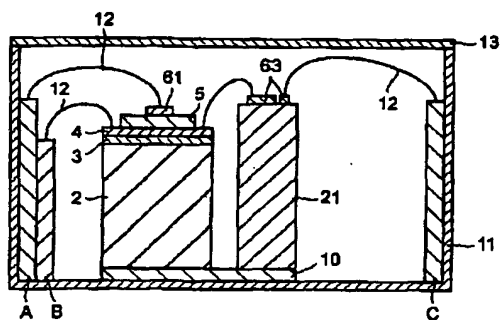
[Drawing 8]



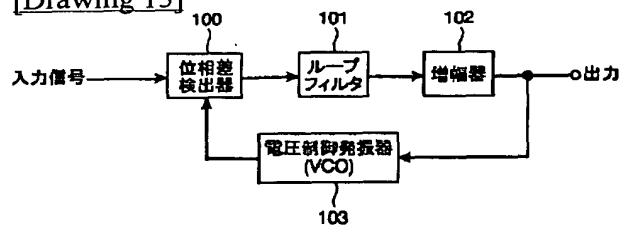
[Drawing 10]



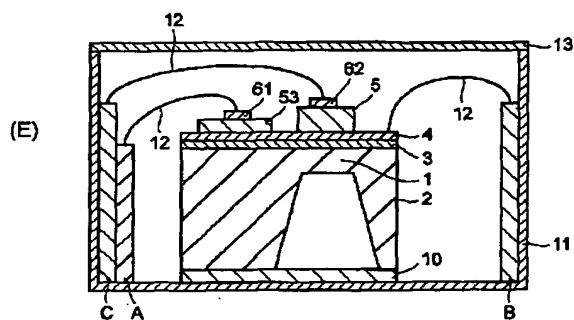
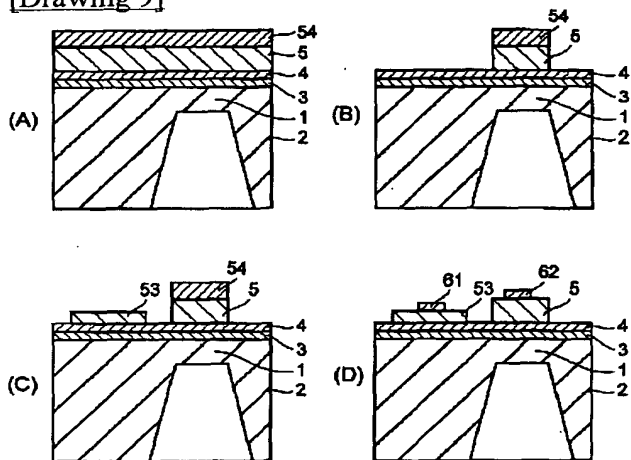
[Drawing 11]



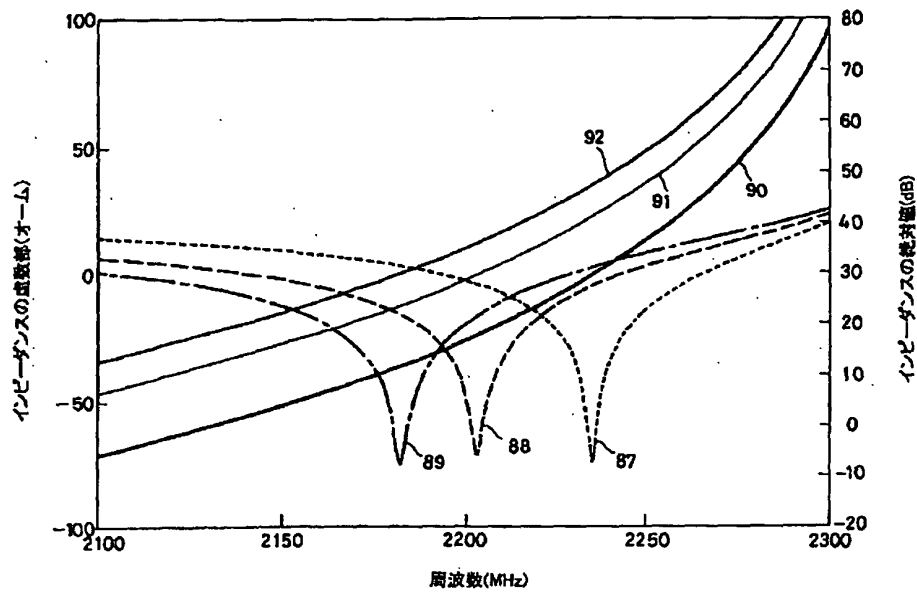
[Drawing 13]



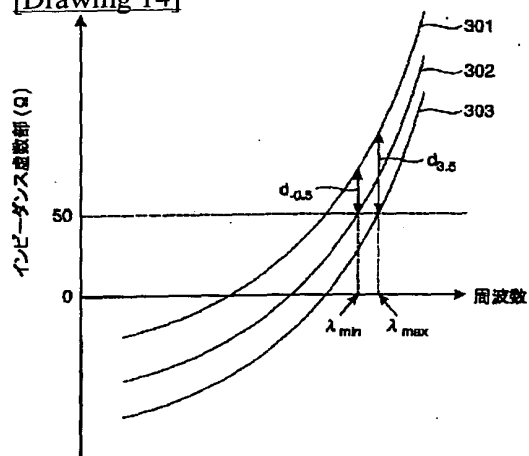
[Drawing 9]



[Drawing 12]



[Drawing 14]



[Translation done.]